



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISIS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN
150 KV DENGAN ADANYA INTERKONEKSI
KALIMANTAN TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN
MENGUNAKAN ANALISIS MODAL**

Wahyu Asrofi Ramadhan
NRP 07111140000146

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISIS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN
150 KV DENGAN ADANYA INTERKONEKSI
KALIMANTAN TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN
MENGUNAKAN ANALISIS MODAL**

Wahyu Asrofi Ramadhan
NRP 07111140000146

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TE 184801

***DYNAMICS ANALYSIS OF KALIMANTAN ELECTRICAL
SYSTEM 150 KV WITH INTERCONNECTION OF EAST
KALIMANTAN AND SOUTH KALIMANTAN USING
MODAL ANALYSIS***

Wahyu Asrofi Ramadhan
NRP 07111140000146

Supervisors
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**ANALISIS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN
150 KV DENGAN ADANYA INTERKONEKSI KALIMANTAN
TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN MENGGUNAKAN
ANALISIS MODAL**

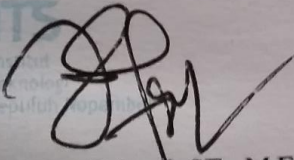
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

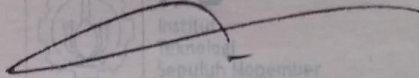
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.
NIP. 195512071980031004



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“Analisis Dinamik Sistem Kelistrikan Kalimantan 150 KV dengan Adanya Interkoneksi Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan Menggunakan Analisis Modal”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Wahyu Asrofi Ramadhan
07111140000146

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

ABSTRAK

ANALISIS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN 150 KV DENGAN ADANYA INTERKONEKSI KALIMANTAN TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN MENGGUNAKAN ANALISIS MODAL

Nama mahasiswa : Wahyu Asrofi Ramadhan
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

Abstrak :

Indonesia adalah salah satu negara kepulauan terbesar di dunia yang terletak di Benua Asia bagian Tenggara dan merupakan negara berkembang di antara negara tetangganya. Perkembangan suatu negara dipengaruhi banyak faktor di antaranya pertumbuhan penduduk dan ekonomi. Seiring bertambahnya penduduk, negara juga melakukan rencana pengembangan salah satunya di sektor kelistrikan yang telah ditertuang pada RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik) untuk meningkatkan rasio elektrifikasi nasional, dengan adanya dasar rancangan tersebut, diperlukan pula analisis kestabilannya. Dalam tugas akhir ini akan membahas *small-signal stability* sistem kelistrikan Kalimantan 150KV AC yang menghubungkan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan untuk mendapatkan rancangan yang sesuai dengan menggunakan *Modal Analysis*.

Modal Analysis memberikan data *eigenvalue*, *mode shape* dan *participation factor*. Sistem dikatakan stabil apabila seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif dan sebaliknya. *Eigenvalue* juga terdapat nilai kritisnya, dimana bagian real mendekati sumbu imajiner sehingga nilai kritis tersebut untuk mengetahui generator mana saja yang memengaruhi tingkat ketidakstabilan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi sebelum dan setelah interkoneksi pada tahun 2018 menyatakan stabil dari sisi *small-signal stability*.

Kata kunci : (*modal analysis, eigenvalue, small-signal stability*)

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

ABSTRACT

DYNAMICS ANALYSIS OF KALIMANTAN ELECTRICAL SYSTEM 150 KV WITH INTERCONNECTION OF EAST KALIMANTAN AND SOUTH KALIMANTAN USING MODAL ANALYSIS

Student Name : Wahyu Asrofi Ramadhan
Supervisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

Abstract :

Indonesia is one of the largest archipelagic countries in the world located in the Southeast Asia Continent and is a developing country among its neighbors. The development of a country is influenced by many factors including population growth and economy. As the population increases, the country also plans to develop one of them in the electricity sector that has been assigned to the RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik / Electricity Supply Business Plan) to increase the national electrification ratio, with the basis of the design, it is also necessary to analyze its stability. In this final project will discuss the small signal stability of the Kalimantan 150KV AC electrical system that connects East Kalimantan and South Kalimantan to get a suitable design using Modal Analysis.

Modal Analysis provides eigenvalue data, mode shape and participation factor. The system is said to be stable if all eigenvalue values are negative and otherwise. Eigenvalue also has a critical value, where the real part approaches the imaginary axis so that the critical value is to know which generator affects the level of system instability. The results of the analysis show that the conditions before and after interconnection in 2018 stated stable in terms of small-signal stability.

Key Word : (modal analysis, eigenvalue, small-signal stability)

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karuniaNya, sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir sampai dengan penyusunan laporan dengan judul “**Analisis Dinamik Sistem Kelistrikan Kalimantan 150 KV dengan Adanya Interkoneksi Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan Menggunakan Analisis Modal**”. Adapun penyusunan laporan ini sebagai hasil dari mata kuliah Tugas Akhir yang merupakan salah satu syarat dalam menempuh studi di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, penulis menemukan banyak pengetahuan dan hal baru yang didapat baik secara teori maupun praktek langsung di lapangan. Hal ini tidak terlepas dari bimbingan dan bantuan baik materil maupun spirital yang telah diberikan kepada penulis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua dan keluarga tercinta yang telah memberikan dorongan baik materi, moril maupun spiritual kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. dan Dr.Ir. Soedibjo, M.MT. selaku dosen pembimbing.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing dari judul Tugas Akhir sebelumnya.
4. Seluruh manajemen dan staff DepartemenTeknik Elektro yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu.
5. Teman-teman dari Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah memberikan semangat dan dorongan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

Hanya Allah yang dapat memberikan balasan kepada semua pihak yang telah membantu penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

Kami menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna vaik dari segi materi maupun pemulisananya. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari pembaca akan sangat dibutuhkan bagi kesempurnaan penyisinan laporan berikutnya.

Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan mafaat menambah wawasan bagi pembaca umumnya serta adik-aik angkatan mahasiswa Departemen Teknik Elektro pada khususnya.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Kestabilan Sudut Rotor	9
2.3 Voltage Stability	11
2.4 Mid-Term and Long-Term Stability	12
2.5 Small Signal Stability	13
2.6 Analisis Modal	15
2.6.1 State Space	15
2.6.2 Titik Ekuilibrium	16
2.6.3 Stabilitas Sistem Dinamik	17
2.6.4 Linierisasi	17
2.6.5 Eigenvalue	19
2.6.6 Eigenvector	19
2.6.7 <i>Eigenvalue</i> dan Kestabilan	20
2.6.8 Eigenvector Kanan – Mode Shape	21
2.6.9 Participation Factor	21
BAB 3 PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN	23
3.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng) 150 KV AC 2018	23

3.2	Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra) 150 KV AC 2018	29
3.3	Proyeksi Pertumbuhan Tenaga Listrik	34
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		37
4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan	37
4.1.1	<i>Modal Analysis</i> pada <i>DigSILENT Power Factory</i>	38
4.2	<i>Modal Analysis</i> Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur 2018	40
4.2.1	Nilai <i>Eigenvalue</i>	40
4.2.2	<i>Mode Shape Eigenvalue</i> (Mode 70).....	41
4.2.3	<i>Participation Factor</i> (Mode 70)	42
4.3	<i>Modal Analysis</i> Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah 2018	43
4.3.1	Nilai <i>Eigenvalue</i>	43
4.3.2	<i>Mode Shape Eigenvalue</i> (Mode 75).....	45
4.3.3	<i>Participation Factor</i> (Mode 75)	46
4.4	<i>Modal Analysis</i> interkoneksi Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan 2018	47
4.4.1	Nilai <i>Eigenvalue</i>	48
4.4.2	<i>Mode Shape Eigenvalue</i> (Mode 177).....	49
4.4.3	<i>Participation Factor</i> (Mode 177)	50
BAB 5 PENUTUP.....		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....		55
BIOGRAFI PENULIS.....		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Metodologi.....	4
Gambar 2.1 Kalsifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	9
Gambar 2.2 Sistem Stabil Dengan Tegangan Konstan	13
Gambar 2.3 Non-Oscilatory Instability Dengan Tegangan Konstan ...	13
Gambar 2.4 Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi	14
Gambar 2.5 Oscilatory Instability Dengan Kontrol Eksitasi	14
Gambar 3.1 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Selatan	24
Gambar 3.2 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Tengah	27
Gambar 3.3 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Timur	30
Gambar 3.4 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Utara	33
Gambar 4.1 <i>Toolbar Modal Analysis</i>	38
Gambar 4.2 Plot <i>Eigenvalue</i> Kaltim 2018	41
Gambar 4.3 <i>Phasor Plot Observeability</i> δ Mode 70	42
Gambar 4.4 Plot <i>Eigenvalue</i> Kalselteng 2018	44
Gambar 4.5 <i>Phasor Plot Observeability</i> δ Mode 75	46
Gambar 4.6 Plot <i>Eigenvalue</i> Kaltim & Kalselteng 2018.....	48
Gambar 4.7 <i>Phasor Plot Observeability</i> δ Mode 177	50

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting	23
Tabel 3.2 Realisasi Kapasitas Trafo GI.....	25
Tabel 3.3 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV	25
Tabel 3.4 Rencana Pengembangan Gardu Induk	26
Tabel 3.5 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting	26
Tabel 3.6 Realisasi Kapasitas Trafo GI.....	28
Tabel 3.7 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV	28
Tabel 3.8 Rencana Pengembangan Gardu Induk	28
Tabel 3.9 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting	29
Tabel 3.10 Realisasi Kapasitas Trafo GI.....	31
Tabel 3.11 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV	31
Tabel 3.12 Rencana Pengembangan Gardu Induk	32
Tabel 3.13 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting	32
Tabel 3.14 Rencana Pembangunan Pembangkit	34
Tabel 3.15 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV	34
Tabel 3.16 Rencana Pengembangan Gardu Induk	34
Tabel 3.17 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kalsel.....	35
Tabel 3.18 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kalteng	35
Tabel 3.19 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kaltim.....	36
Tabel 4.1 <i>Eigenvalue</i> dengan <i>Damping</i> di Bawah 10%	41
Tabel 4.2 <i>Observeability</i> δ Mode 70.....	42
Tabel 4.3 <i>Participation Factor</i> δ Mode 70.....	43
Tabel 4.4 <i>Participation Factor</i> ω Mode 70.....	43
Tabel 4.5 <i>Eigenvalue</i> dengan <i>Damping</i> di Bawah 10%	44
Tabel 4.6 <i>Observeability</i> δ Mode 75	45
Tabel 4.7a <i>Participation Factor</i> δ Mode 75.....	46
Tabel 4.7b <i>Participation Factor</i> δ Mode 75.....	47
Tabel 4.8 <i>Participation Factor</i> ω Mode 75	47
Tabel 4.9a <i>Eigenvalue</i> dengan <i>Damping</i> di Bawah 10%	48
Tabel 4.9b <i>Eigenvalue</i> dengan <i>Damping</i> di Bawah 10%	49
Tabel 4.10 <i>Observeability</i> δ Mode 177	49
Tabel 4.11a <i>Participation Factor</i> δ Mode 177	50
Tabel 4.11b <i>Participation Factor</i> δ Mode 177	51
Tabel 4.12a <i>Participation Factor</i> ω Mode 177	51
Tabel 4.12b <i>Participation Factor</i> ω Mode 177	52

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Republik Indonesia atau Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI), atau lebih umum disebut Indonesia, merupakan salah satu negara kepulauan terbesar di dunia. Terletak di benua terbesar yakni Asia terletak di bagian Tenggara yang dilewati garis khatulistiwa dan berada di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia dengan jumlah pulau besar dan kecil mencapai 17.504. Pada tahun 2018 Populasi tercatat mencapai 270.054.856 juta jiwa menjadikan negara berpenduduk terbesar keempat di dunia, jumlah tersebut tersebar dalam 5 pulau besar, yaitu Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi dan Papua serta secara *de facto* terdiri dari 34 provinsi.

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang terlihat dari sisi pembangunan ekonomi yang berkelanjutan hingga saat ini, khususnya sektor kelistrikan yang meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk maupun lapangan pekerjaan. Salah satunya di Pulau Kalimantan, meskipun kebutuhan sumber daya listrik lebih rendah dibandingkan Jawa-Bali, namun memiliki potensi energi yang melimpah dikarenakan Kalimantan merupakan lumbung energi nasional sebagai penghasil batubara dan migas terbesar.

Segala hal tentang rencana berkelanjutan suatu negara pasti tertuang dalam rencana usaha salah satunya sektor kelistrikan, yakni sudah tertuang dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL). Dasar rencana ini diharapkan dapat meningkatkan rasio elektrifikasi nasional salah satu caranya adalah dengan mengembangkan sistem kelistrikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Pada sistem kelistrikan Kalimantan direncanakan pengembangan sistem kelistrikan dengan melakukan interkoneksi sistem kelistrikan antar provinsi Kalimantan untuk kedepannya. Melimpahnya sumber energi di pulau Kalimantan menjadikan pembangunan pembangkit sangat memungkinkan dibangun di Kalimantan namun pertumbuhan beban yang lambat dapat mengakibatkan daya yang dibangkitkan akan lambat terserap oleh beban sehingga dapat menimbulkan kerugian.

Seiring dengan bertambahnya beban dan terjadinya fluktuasi beban pada sistem kelistrikan Kalimantan oleh karena itu diperlukan studi

kestabilan *small-signal stability* dimana dapat melihat kestabilan sistem saat terjadi gangguan-gangguan kecil dengan menggunakan *Modal Analysis*. Dengan menggunakan salah satu fungsi analisis dalam *software DigSILENT PowerFactory 15.1*, kita bisa mendapatkan nilai-nilai dari *eigenvalue* sistem dimana berdasarkan nilai-nilai *eigenvalue* ini dapat dilihat karakteristik sistem dan kestabilan sistem tersebut. Gangguan kecil pada saat kondisi beban puncak karena fenomena, tidak dapat diamati di transient stability, karena AVR dan Governor sudah bekerja, dan dengan *Modal Analysis* dapat dicari sumber yang menyebabkan sistem tidak stabil sehingga mudah bagi seorang *dispatcher* untuk bisa *rescheduling* serta melakukan pengaturan daya.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Memodelkan sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan yang saling terinterkoneksi dengan menggunakan tegangan 150 kV AC.
2. Menganalisis kestabilan berdasarkan nilai *eigenvalue* yang didapatkan.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Mendapatkan hasil analisis kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan berdasarkan nilai *eigenvalue* yang didapatkan dari Analisis Modal.
2. Mengetahui kestabilan *small-signal stability* sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Obyek yang dianalisa adalah sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan sebelum dan setelah interkoneksi pada tahun 2018.
2. Nilai *eigenvalue* yang akan di perhatikan adalah *eigenvalue* dengan mode elektromekanikal yaitu pada frekuensi 0,1-2 Hz dengan *damping ratio* di bawah 5 %.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka

Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai kestabilan sistem tenaga pada hal ini mengenai *small signal staility*, pada tahap ini akan dicari literatur-literatur yang berhubungan dengan topik yang di bahas. Selanjutnya dilakukan kajian untuk mengetahui bagian-bagian yang dapat diadopsi dan di kembangkan pada penelitian ini.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk memodelkan sistem kelistrikan Kalimantan, data-data yang dibutuhkan adalah data beban, pembangkit, dan peralatan.

3. Pemodelan Sistem

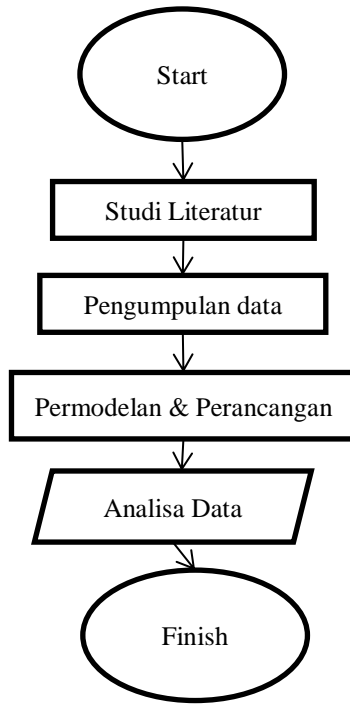
Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem berdasarkan data yang telah diperoleh sebelumnya kedalam *single line* diagram dan dimodelkan pada software *DigSILENT PowerFactory 15.1*. Pemodelan sistem digunakan untuk menyimulasikan analisis kestabilan. pemodelan berdasarkan peta sistem kelistrikan Kalimantan yang terhubung ke Jawa.

4. Simulasi dan Analisis Kestabilan

Dari hasil simuasi menggunakan *Modal analysis* didapatkan nilai *eigenvalue* yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan kestabilan sistem.

5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisis yang telah dilakukan.



Gambar 1.1 Metodologi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Kajian Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

- Bab 3 : Perancangan Sistem Kelistrikan Kalimantan
Bab ini membahas mengenai sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan beserta data-data penunjang yang digunakan untuk penulisan Tugas Akhir.
- Bab 4 : Simulasi dan Analisis
Bab ini membahas hasil simulasi dengan memperhatikan nilai *eigenvalue* yang didapatkan, dan melihat *observeability* atau *mode shape* dan *participation factor* dari *eigenvalue* yang didapat.
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut :

1. Sebagai acuan untuk PT. PLN mengenai kelayakan sistem kelistrikan Kalimantan dari sisi kestabilan *small-signal stability*.
2. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya yang hendak mengambil topik serupa.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali *governor* maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil [1].

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanikal yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*black out*).

Sistem yang baik adalah sistem yang dapat meredam osilasi saat terjadi gangguan kembali ke kondisi *steady*. Gangguan bisa berupa gangguan kecil maupun gangguan besar. Pada gangguan kecil, satu dari

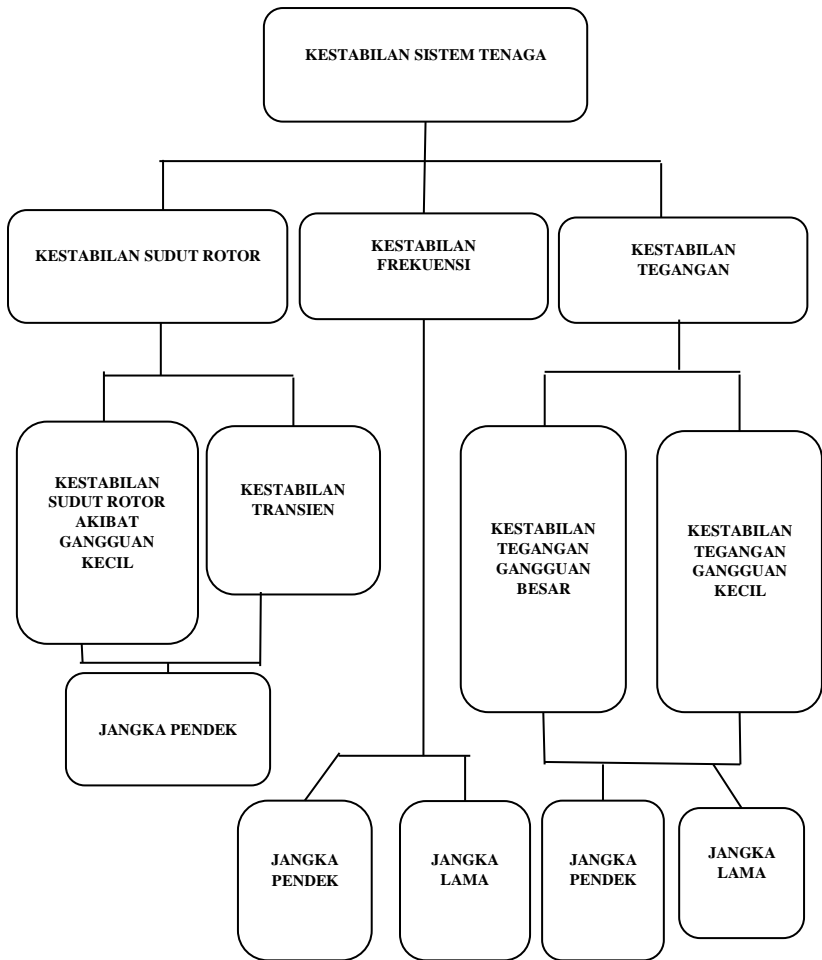
elemen sistem dinamik dapat dianalisis menggunakan persamaan linear (*small-signal analysis*). Gangguan kecil yang terjadi berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan dan bertingkat. *Trip* yang dialami oleh jaring tenaga listrik dianggap sebagai gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada aliran itu tidak signifikan. Selain itu terdapat pula gangguan besar yang terjadi pada sistem, berupa gangguan yang menghasilkan kejutan tegangan pada bus, gangguan hubung singkat, lepasnya generator maupun beban besar atau putusnya interkoneksi dua subsistem.

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*), kestabilan tegangan (*voltage stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi *small-signal stability* dan *transient stability*. Small Signal Stability adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanikal yang tak teredam, sedangkan Transient Stability dikarenakan kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

Dalam referensi lain [2] dari paper IEEE Transactions On Power Systems dengan judul Definition and Classification of Power System Stability, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu :

1. Kestabilan sudut rotor.
2. Kestabilan frekuensi.
3. Kestabilan tegangan.

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi stabil setelah gangguan sistem yang parah menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban, ketika beban lepas tidak disengaja. Ketidakstabilan yang menghasilkan perubahan frekuensi berkelanjutan menyebabkan *trip*-nya unit pembangkit dan/atau beban.



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [2].

2.2 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang saling terhubung pada sistem tenaga untuk menjaga sinkronisasinya. Osilasi elektromekanikal pada sistem tenaga sangat melekat dengan

permasalahan kestabilan sudut rotor. Faktor fundamental yang menyebabkan kestabilan sudut rotor adalah keluaran daya dari mesin sinkron berbeda satu sama lain saat rotor berosilasi [1]. Pada kondisi mantap (*steady state*) terdapat kondisi dimana masukan torsi mekanikal dan keluaran torsi elektrik adalah sama dan kecepatan dijaga konstan, namun jika kondisi tersebut diberikan gangguan atau mengalami gangguan kestabilan sistem akan berubah dan mengakibatkan rotor mesin akan mengalami percepatan atau perlambatan.

Ketika dua atau lebih mesin sinkron saling berhubungan, tegangan stator dan arus semua mesin harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan rotor mekanik masing-masing disinkronisasi ke frekuensi ini. Oleh karena itu, rotor semua mesin sinkron yang saling berhubungan harus sinkron.

Pada saat keadaan dimana mesin sinkron kehilangan sinkronisasinya atau biasa disebut dengan *fall out of step*, rotor akan bergerak pada kecepatan tertinggi atau dalam kecepatan terendahnya dibandingkan dengan kecepatan yang dibutuhkan untuk membangkitkan tegangan pada frekuensi sistem. *Slip* antara stator yang berputar dan kumparan rotor mengakibatkan fluktuasi yang besar pada keluaran daya mesin, arus, dan tegangan dan mengharuskan sistem proteksi untuk mengisolasi mesin sinkron yang tidak stabil dari sistem [1].

Pada sistem tenaga listrik, perubahan pada torsi elektrik dari mesin sinkron akibat dari gangguan dapat di bentuk dalam persamaan :

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

Dimana

$T_S \Delta \delta$ adalah komponen dari perubahan torsi pada fasa dengan sudut rotor gangguan ($\Delta \delta$) dan dapat disebut juga dengan komponen sinkronisasi torsi; dan T_S adalah koefisien sinkronisasi torsi.

$T_D \Delta \omega$ adalah komponen torsi dengan fasa pada perubahan kecepatan ($\Delta \omega$) dan disebut juga sebagai torsi redaman; dan T_D adalah koefisien torsi redaman.

Kestabilan sistem bergantung pada kedua komponen pada persamaan 2.1 yaitu pada komponen torsi. Kurangnya torsi sinkronisasi

menyebabkan ketidakstabilan pada sudut rotor, sedangkan kurangnya torsi redaman menyebabkan ketidakstabilan osilasi.

Kestabilan Sudut Rotor adalah kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling berhubungan atau terinterkoneksi untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan. Pada kestabilan sudut rotor di kategorikan menjadi dua yaitu [1] :

1. *Small-signal (small-disturbance) stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang terjadi secara kontiniu pada sistem seperti perubahan beban maupun pembangkitan. Ketidakstabilan dapat terjadi berupa dua bentuk : (i) peningkatan sudut rotor yang stabil karena kurangnya torsi sinkronisasi, atau (ii) osilasi rotor akibat peningkatan amplitudo karena kurangnya torsi redaman.
2. *Transient stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika mengalami gangguan besar. Respons sistem yang dihasilkan melibatkan penyimpangan sudut rotor dan dipengaruhi oleh hubungan *non-linear power-angle*. Stabilitas tergantung pada status pengoperasian awal sistem dan tingkat keparahan gangguan. Biasanya, sistem diubah sehingga operasi *steady state* pasca gangguan berbeda dari sebelum gangguan. Studi gangguan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan osilasi antar wilayah yang dominan, maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik

2.3 Voltage Stability

Voltage stability adalah kemampuan sistem tenaga untuk memertahankan tegangan yang diterima di semua bus dalam kondisi sistem operasi normal dan setelah mengalami gangguan. Sebuah sistem memasuki keadaan ketidakstabilan tegangan ketika muncul gangguan, peningkatan permintaan beban atau perubahan dalam kondisi sistem menyebabkan penurunan tegangan secara progresif dan tidak terkendali. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan adalah ketidakmampuan sistem daya untuk memenuhi permintaan daya reaktif. Inti dari masalah biasanya adalah penurunan tegangan terjadi ketika daya aktif dan aliran daya reaktif melalui reaktansi induktif yang terhubung

dengan jaringan transmisi. Dalam analisisnya, klasifikasi *voltage stability* terbagi menjadi 2, yaitu :

1. *Large-disturbance voltage stability*, berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah gangguan besar seperti kesalahan sistem, hilangnya generator, atau kontingensi sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik beban dan interaksi kontinu dari kontrol diskrit dan pengaman. Penentuan stabilitas gangguan besar membutuhkan pemeriksaan kinerja dinamis nonlinier suatu sistem selama periode waktu yang cukup untuk menangkap interaksi dari perangkat seperti ULTC dan pembatas arus generator. Kurun waktu yang diperlukan dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, diperlukan simulasi dinamis jangka panjang untuk analisis.
2. *Small-disturbance voltage stability*, berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah gangguan kecil seperti perubahan beban sistem. Bentuk stabilitas ini ditentukan oleh karakteristik beban, kontrol kontinyu, dan kontrol diskrit pada waktu tertentu. Konsep ini berguna dalam menentukan, kapan saja, bagaimana tegangan sistem akan merespon perubahan sistem kecil.

2.4 Mid-Term and Long-Term Stability

Istilah stabilitas jangka panjang dan stabilitas jangka menengah relatif baru pada literatur tentang stabilitas sistem tenaga. Hal ini diperkenalkan sebagai hasil dari kebutuhan untuk menangani masalah yang terkait dengan respon dinamis dari sistem tenaga untuk gangguan parah. Gangguan sistem yang parah menyebabkan kenaikan tegangan, frekuensi, dan aliran daya dimana memicu keterlambatan proses kontrol, dan perlindungan yang tidak dimodelkan dalam studi stabilitas transien konvensional. Waktu karakteristik dari proses dan perangkat yang diaktifkan oleh kenaikan tegangan dan pergeseran frekuensi akan berkisar dari hitungan detik hingga beberapa menit, berikut klasifikasi rentang waktunya :

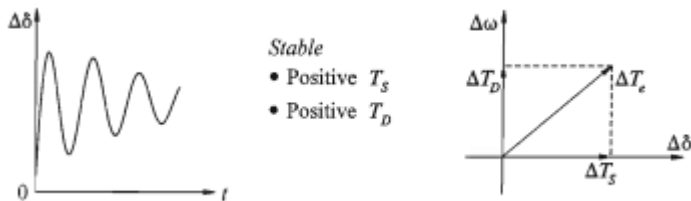
Short-term or transient : 0 – 1 detik

Mid-term : 10 – beberapa menit

Long-term : beberapa menit – 10 Menit

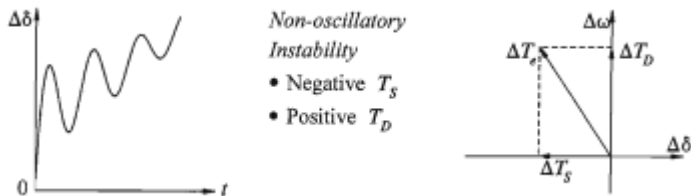
2.5 Small Signal Stability

Small-signal (small-disturbance) stability adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang terjadi secara kontiniu pada sistem seperti perubahan beban maupun pembangkitan. Sifat respon sistem terhadap gangguan kecil tergantung pada sejumlah faktor termasuk operasi awal, kekuatan sistem transmisi dan jenis kontrol eksitasi generator yang digunakan. Untuk generator yang terhubung secara radial ke sistem besar, tanpa adanya AVR (yaitu, dengan tegangan medan konstan) ketidakstabilan ini disebabkan oleh kurangnya torsi sinkronisasi. Hal ini menghasilkan ketidakstabilan *non-oscillatory*, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2**. Sedangkan dengan adanya AVR, gangguan kecil menyebabkan ketidakstabilan osilasi pada **Gambar 2.4**.



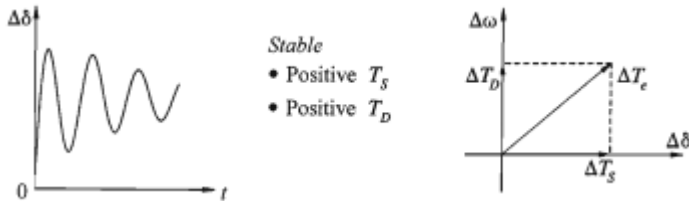
Gambar 2.2 Sistem Stabil Dengan Tegangan Konstan.

Gambar 2.2 merupakan respon sistem tenaga yang stabil dengan menggunakan tegangan konstan, bernilai torsi sinkronisasi dan torsi redaman positif.



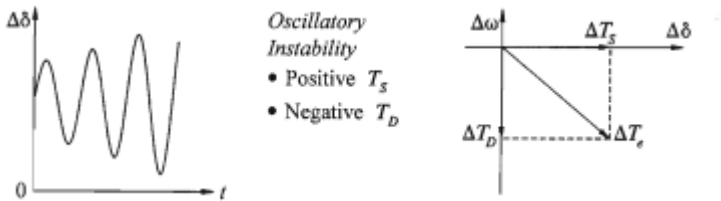
Gambar 2.3 Non-Oscillatory Instability Dengan Tegangan Konstan.

Gambar 2.3 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan tegangan konstan, bernilai torsi sinkronisasi negatif sedangkan torsi redaman positif.



Gambar 2.4 Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi.

Gambar 2.4 merupakan respon sistem tenaga yang stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi, bernilai torsi sinkronisasi dan torsi redaman positif.



Gambar 2.5 Oscillatory Instability Dengan Kontrol Eksitasi.

Gambar 2.5 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi, bernilai torsi sinkronisasi positif sedangkan torsi redaman bernilai negatif.

Perubahan pada sistem tenaga seperti perubahan tegangan, arus, dan aliran daya antara area yang berbeda. Sistem tenaga yang besar akan memiliki mode osilasi elektromekanikal yang dominan pada saat terjadi gangguan. Mode osilasi elektromekanikal di klasifikasikan berdasarkan [1] sebagai berikut :

1. *Mode inter-area* pada frekuensi 0.1-0.7 Hz.

Pada mode inter-area dimana generator dari dua area yang berbeda saling ber-osilasi satu sama dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan pada saluran yang menghubungkan kedua area

pembangkitan atau pada saluran transmisi yang di matikan untuk keperluan pemeliharaan.

2. *Mode local- area* pada frekuensi 0.7-2 Hz.

Pada mode lokal area ini dimana generator pada satu area yang sama saling ber-osilasi satu dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan yang letaknya dekat dengan area generator tersebut.

2.6 Analisis Modal

Analisis modal atau *modal analysis* adalah salah satu metode yang digunakan untuk analisis kestabilan yang dikarenakan oleh gangguan kecil atau biasa disebut dengan *small-signal stability*, *modal analysis* biasa juga disebut dengan perhitungan *eigenvalue* dimana *eigenvalue* dapat memberikan informasi tentang kestabilan sistem tenaga.

2.6.1 State Space

Karakteristik dari sistem dinamis seperti sistem tenaga dapat di deksripsikan sebagai persamaan diferensial dimana dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.2)$$

dimana

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

\mathbf{x} adalah sebagai *state vector* dan x_i sebagai *state variable*, sedangkan \mathbf{u} adalah sebagai masukan ke sistem. Waktu di notasikan sebagai t dan *state variable* yang berhubungan dengan waktu di notasikan sebagai \dot{x} jika turunan dari *state variable* sistem tidak merupakan persamaan yang berhubungan dengan waktu maka sistem dapat dikatakan *autonom* persamaan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk keluaran dari sistem dapat pula di notasikan dalam bentuk *state variable* dan *input variable* :

$$y = g(x, u) \quad (2.4)$$

state variable x meliputi kecepatan rotor, sudut rotor dan semua variabel yang ada pada generator, seperti pada contoh berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \delta_{gen1} \\ \delta_{gen2} \\ \omega_{gen1} \\ \omega_{gen2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Jumlah dari *state variable* bergantung pada model yang digunakan untuk merepresentasikan generator serta banyaknya generator pada sistem, namun pada mode electromekanikal variabel yang sangat berpengaruh adalah sudut rotor δ_i dan kecepatan sudut rotor dari generator ω_i . *State variable* y meliputi variabel keluaran dari sistem seperti tegangan pada bus U_i sudut tenggangannya θ_i .

$$y = \begin{bmatrix} U_{Bus1} \\ U_{Bus2} \\ \theta_{Bus1} \\ \theta_{Bus2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

2.6.2 Titik Ekuilibrium

Titik ekuilibrium adalah titik dimana semua turunan $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n$ bernilai nol. Dimana dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$f(x_0) = 0 \quad (2.5)$$

Dimana x_0 adalah *state vector* x pada titik ekuilibrium.

2.6.3 Stabilitas Sistem Dinamik

Stabilitas sistem linear sepenuhnya independen dari input, dan keadaan sistem stabil dengan input nol akan selalu kembali ke *state space*, independen dari keadaan awal yang terbatas. Sebaliknya, stabilitas sistem nonlinear tergantung pada jenis dan besarnya input, dan keadaan awal. Faktor-faktor ini harus diperhitungkan dalam mendefinisikan stabilitas sistem nonlinear. Dalam teori sistem kontrol, itu adalah praktek umum untuk mengklasifikasikan stabilitas sistem nonlinear ke dalam kategori berikut, tergantung pada wilayah *state space* :

1. *Local stability*.

Sistem ini dikatakan stabil secara local jika mengalami gangguan kecil, tetap berada dalam wilayah titik ekuilibrium. Jika, karena t meningkat, sistem kembali ke keadaan semula, dikatakan stabil asimtotik. Perlu dicatat bahwa definisi umum stabilitas lokal tidak mengharuskan kembali dalam keadaan semula dan mencakup siklus *small-limit*. Dalam prakteknya, kita biasanya tertarik pada stabilitas asimtotik. Stabilitas dapat dipelajari dengan linierisasi persamaan sistem nonlinier tentang titik ekuilibrium/setimbang yang dipertanyakan.

2. *Finite stability*.

Keadaan sistem tetap dalam wilayah yang terbatas R , dikatakan stabil jika, keadaan sistem kembali ke titik ekuilibrium asli dari titik mana pun dalam R , itu adalah stabil asimtotik dalam daerah terbatas R .

3. *Global stability*.

Sistem dikatakan stabil secara global jika R mencakup seluruh ruang terbatas.

2.6.4 Linierisasi

Untuk mendapatkan performansi *small signal stability* yang akan diperhatikan oleh karena itu sistem harus di linierisasi pada titik ekuilibriumnya dan stabilitas dapat dilihat dari nilai *eigenvalue* yang didapatkan setelah sistem di linierisasi sebagai berikut :

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.6)$$

state diasumsikan diberikan gangguan sebagai berikut :

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

Dimana Δ merupakan perubahan kecil, sehingga didapatkan state baru sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \\ \dot{x} &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Karena gangguan dianggap kecil fungsi $f(x,u)$ dapat di tuliskan dalam bentuk deret Taylor dengan mengabaikan orde kedua dan selanjutnya dari Δx dan Δu sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ \dot{x}_i &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n \\ &\quad + \frac{\partial f_i}{\partial u_i} \Delta u_i + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned}$$

Karena $\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0$, didapatkan

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

begitu juga dengan *state variable* keluaran dari sistem didapatkan

$$\Delta y_i = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

Sehingga bentuk *state space* yang telah di linierisasi di titik ekuilibrium dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.8)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.9)$$

2.6.5 Eigenvalue

Eigenvalue adalah sebuah bilangan skalar dari sebuah matrix A yang dapat menjadi suatu karakteristik dari sebuah matriks *eigenvalue* dinotasikan sebagai λ dimana *eigenvalue* atau biasa juga disebut dengan akar ciri atau merupakan suatu nilai yang dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu variable terhadap pembentukan karakteristik sebuah matriks, *eigenvalue* didapatkan berdasarkan persamaan :

$$A\phi = \lambda\phi \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan 2.10, nilai *eigenvalue* didapatkan dari :

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2.11)$$

Karena $\phi \neq 0$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.12)$$

Keterangan,

A Matriks $n \times n$
 I Matrik identitas $n \times n$

Eigenvalue dapat berupa bilangan *real* atau kompleks. Jika matriks A adalah *real* maka nilai *eigenvalue* yang akan muncul dapat berupa bilangan kompleks.

2.6.6 Eigenvector

Untuk setiap nilai *eigenvalue* λ , n -kolom *vector* Φ disebut dengan *eigenvector* kanan dari matriks A yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue* λ sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

Eigenvector kanan memiliki bentuk sebagai berikut :

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Karena persamaan $(A - \lambda I)\Phi_i$ adalah homogen, $k\Phi_i$ juga merupakan solusi, *eigenvector* yang ditentukan hanya oleh faktor pengali skalar atau dapat ditulis sebagai berikut :

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

ψ_i disebut dengan *eigenvector* kiri yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue*. *Eigenvector* kiri memiliki bentuk sebagai berikut :

$$\psi_i = [\psi_{i1} \psi_{i2} \dots \psi_{i3}]$$

2.6.7 Eigenvalue dan Kestabilan

Karakteristik suatu mode yang berdomain waktu pada sistem berdasarkan *eigenvalue* λ adalah sesuai dengan persamaan $e^{\lambda t}$ sehingga sistem dapat ditentukan kestabilannya berdasarkan *eigenvalue* dengan ketentuan sebagai berikut :

- a. *Eigenvalue real* berhubungan dengan mode non-osilasi. Nilai *real* negatif dari *eigenvalue* menunjukkan mode penurunan atau *decaying mode*. Semakin besar magnitudenya semakin cepat. Nilai *real* positif dari *eigenvalue* menunjukkan ketidakstabilan sistem.
- b. *Eigenvalue* kompleks muncul dalam bentuk pasangan konjugasi, tiap nilai berhubungan dengan mode osilasi. Nilai *real* dari *eigenvalue* kompleks memberikan informasi tentang redaman sedangkan bagian imajiner memberikan informasi tentang frekuensi osilasi. Nilai negatif dari bagian *real* menunjukkan osilasi yang teredam sedangkan nilai positif menunjukkan osilasi yang amplitudonya terus meningkat. *Eigenvalue* kompleks di berikan sebagai berikut :

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.15)$$

Dimana frekuensi osilasi dalam Hz didapatkan :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.16)$$

Dan rasio redaman didapatkan berdasarkan :

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.17)$$

2.6.8 Eigenvector Kanan – Mode Shape

Matriks dari *eigenvector* kanan Φ bisa juga disebut sebagai *mode shape*. Setiap *mode shape* Φ memberikan informasi spesifik tentang aktivitas dari *state variable* Δx saat terjadi mode osilasi. Variasi dari suatu *state variable* saat muncul suatu mode adalah :

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{j=n} \phi_{ij} \xi_j \quad (2.18)$$

Koefisien dari Φ memberikan informasi bagaimana *state variable* x_i akan terdampak pada saat terjadi mode osilasi. Semakin besar magnitudo dari Φ semakin besar pula *state variable* terdampak sehingga *state variable* tersebut dapat diamati oleh karena ini *eigenvector* kanan dapat juga disebut sebagai *observeability*. *Mode shape* juga memberikan informasi mengenai variasi yang disebabkan oleh suatu mode, ini dapat digunakan untuk mengumpulkan generator yang memiliki karakteristik yang sama dan untuk mengetahui tipe dari osilasi baik itu osilasi inter-area, lokal, maupun intra-area.

2.6.9 Participation Factor

Mode shape dapat digunakan untuk mengetahui *state variable* mana yang dapat dengan mudah dilihat atau dalam hal ini disebut dengan *observeability*. Namun belum memberikan informasi *state variable* mana yang memberikan kontribusi terhadap nilai *eigenvalue*. *Participation factor* merupakan kombinasi dari *eigenvector* kanan dan kiri yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \dots \mathbf{P}_n] \quad (2.19)$$

Dengan

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix}$$

Participation factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*.

BAB 3

PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN TIMUR DAN KALIMANTAN SELATAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan yang saling terinterkoneksi yang diasumsikan dibagi menjadi 2 area yaitu area Provinsi Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng), Provinsi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra). Pada kedua area yang terpisah ini masih menggunakan tegangan 150 kV untuk transmisinya. Sehingga dilakukan perencanaan untuk menghubungkan kedua area tersebut.

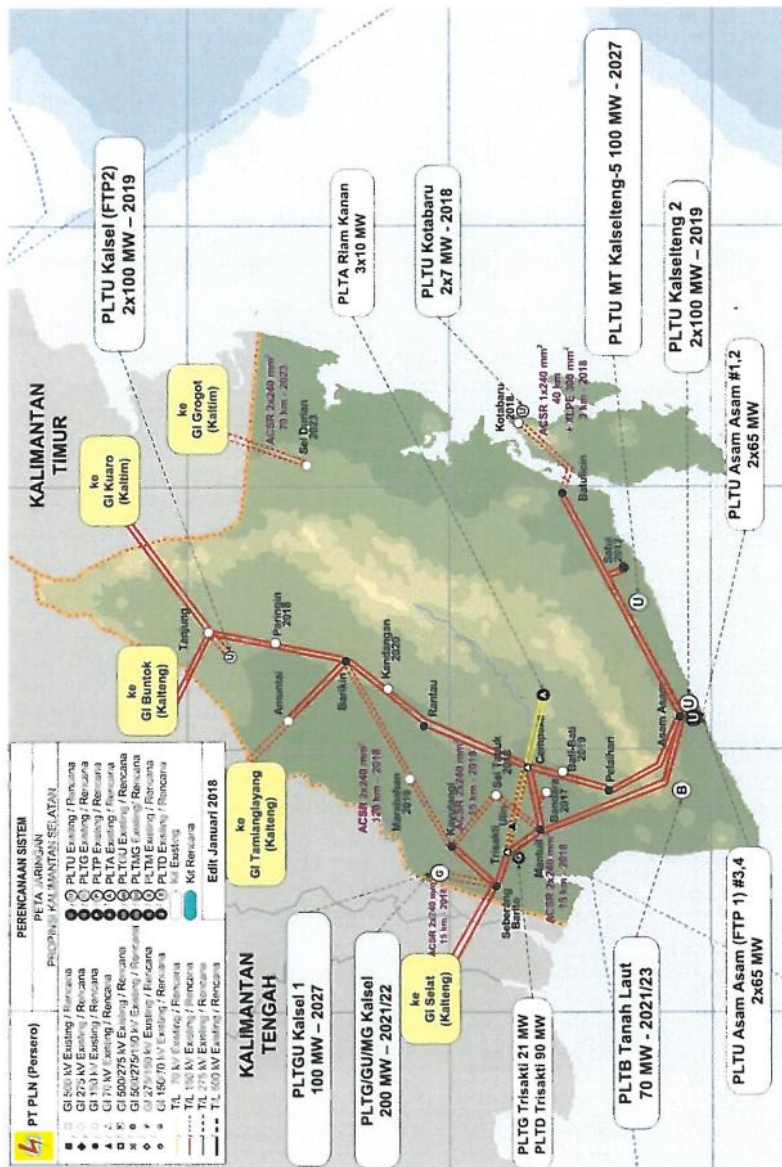
3.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng) 150 KV AC 2018

Perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan area Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng) meliputi wilayah Sampit, Palangkaraya dan Banjarmasin tertuang dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2018-2027.

Sistem tenaga listrik Provinsi Kalimantan Selatan sebagian besar dipasok dari Sistem Barito, sedangkan sistem-sistem *isolated* tersebar antara lain Kotabaru serta Unit Listrik Desa (ULD) dipasok dari PLTD setempat. Sistem Barito merupakan sistem interkoneksi terbesar yang membentang dari Batu Licin hingga ke Sampit di Kalimantan Tengah. Kondisi saat ini sistem tenaga listrik dilihat pada **gambar 3.1**, **tabel 3.1** daya terpasang dan beban puncak, **tabel 3.2** kapasitas trafo GI, **tabel 3.3** pengembangan transmisi 150 KV, **tabel 3.4** pengembangan GI.

Tabel 3.1 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting.

No	Sistem	Jenis	Bahan Bakar	PT	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)	Beban Puncak (MW)
1	Barito	PLTU/ A/G/D	Batubara/ Air/BBM	PLN	535.2	448.8	462.3
2	Kotabaru	PLTD	BBM	PLN	20.5	11.39	10.9
3	ULD (19)	PLTD	BBM	PLN	9.6	8	7.2
Jumlah					565.3	468.7	480.4



Gambar 3.1 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Selatan.

Tabel 3.2 Realisasi Kapasitas Trafo Gardu Induk.

No	GI	Tegangan (KV)	Jumlah	Kapasitas (MVA)
1	Cempaka	150/20	2	90
2	Cempaka	70/2	2	20
3	Riam Kanan/Aranio	70/2	1	6
4	Banjarmasin	70/2	4	90
5	Trisakti	70/2	5	47
6	Trisakti	150/20	1	60
7	Mantuil	150/20	3	110
8	Seberang Barito	150/20	2	40
9	Selat	150/20	2	50
10	Barikin	150/20	2	60
11	Tanjung	150/20	1	60
12	Amuntai	150/20	1	30
13	Asam-asam	150/20	2	40
14	Pelaihari	150/20	2	60
15	Rantau/Binuang	150/20	2	60
16	Batulicim	150/20	2	60
17	Kayu Tangi	150/20	1	30
18	Bandara	150/20	2	120
19	Satui	150/20	1	30
Jumlah			38	1063

Tabel 3.3 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV.

No	Dari - Ke	Tegangan (KV)	Jenis	KMS
1	Barikin - Kayutangi	150	2 cct. ACSR 2xHawk	240
2	Batu Licin - <i>Landing Point</i> Batulicin	150	2 cct. ACSR	6
3	<i>Landing Point</i> P.Laut - Kotabaru	150	2 cct. ACSR 1xHawk	74
4	Seberang Barito - Trisakti	150	<i>Uprating</i> , 2 cct, HTLS (ext 1xHawk)	12
5	PLTU Kalsel 1 (FTP 2) - Tanjung	150	2 cct. ACSR 2xHawk	100
6	<i>Landing Point</i> (Batulicin - P.Laut)	150	2 cct, kabel laut	6
7	Kayutangi - Sel Tabuk	150	2 cct. ACSR 2xHawk	30
8	Sel Tabuk - Mantuil	150	2 cct. ACSR 2xHawk	30
9	Trisakti - Ulin (GIS)	150	2 cct. ACSR 1xHawk	24

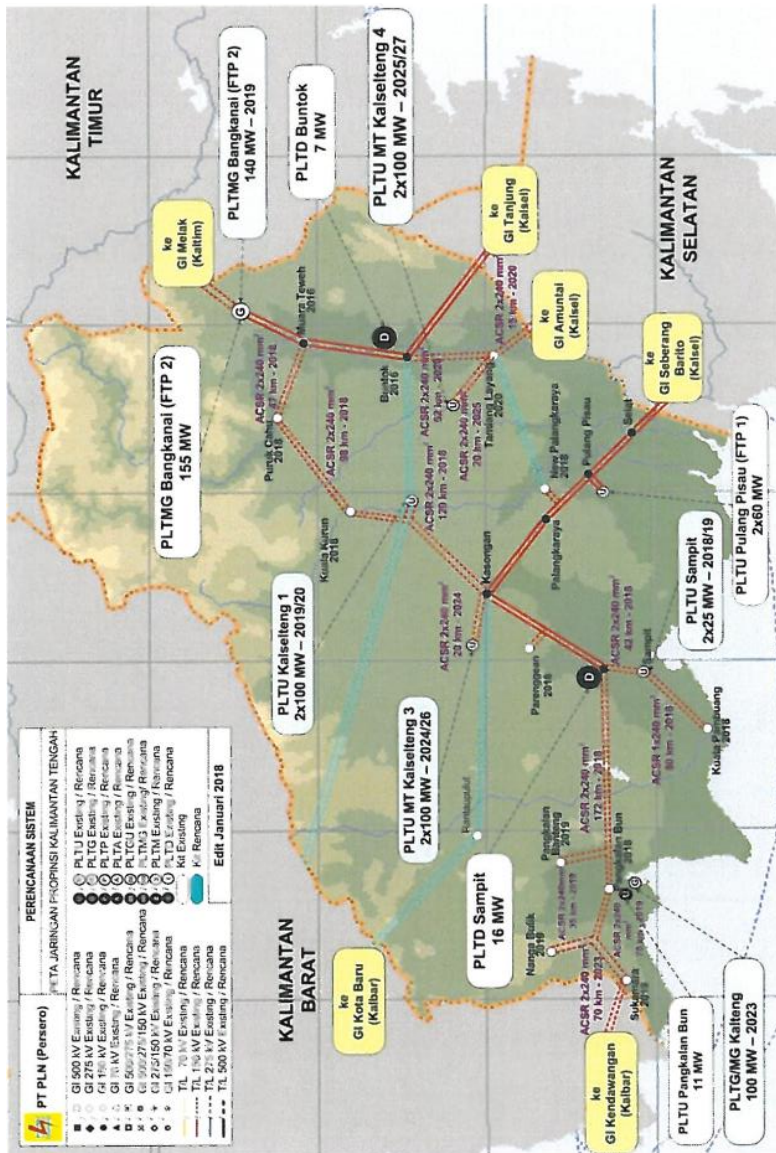
Tabel 3.4 Rencana Pengembangan GI.

No	GI	Tegangan (KV)	Ket	Kapasitas (MVA)
1	Tanjung	150/20	<i>Ext</i>	60
2	Amuntai	150/20	<i>Ext</i>	60
3	Barikin	150/20	<i>Ext</i>	60
4	Paringin	150/20	<i>New</i>	30
5	Batulicin - Kotabaru	150/20	<i>Ext LB</i>	3 LB
6	Kotabaru	150/20	<i>New</i>	30
7	Banjarmasin/Ulin (GIS)	150/20	<i>New</i>	60
8	Tanjung <i>Ext LB</i> (PLTU Kalsel (FTP 2))	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB
9	Sel Tabuk	150/20	<i>New</i>	60
10	Kayutangi - Sel Tabuk	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB
11	Trisakti - Ulin (GIS)	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB
12	Sel Tabuk - Mantuil	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB
13	Mantuil - Sel Tabuk	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB
14	Seberang Barito - Kalsel <i>Peaker</i>	150/20	<i>Ext LB</i>	2 LB

Sistem tenaga listrik Provinsi Kalimantan Tengah dipasok dari sistem interkoneksi 150 KV Barito melalui beberapa GI di Kalteng yaitu GI Selat, GI Pulang Pisau, GIS Mintin, GI Palangkaraya, GI Kasongan dan GI Sampit. Sistem tenaga lainnya merupakan sistem *isolated* dengan daya mampu pembangkitan rata-rata dalam kondisi cukup. Kondisi saat ini sistem tenaga listrik dilihat pada **gambar 3.2**, **tabel 3.5** daya terpasang dan beban puncak, **tabel 3.6** kapasitas trafo GI, **tabel 3.7** pengembangan transmisi 150 KV, **tabel 3.8** pengembangan GI.

Tabel 3.5 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting.

No	Sistem	Jenis	Bahan Bakar	PT	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)	Beban Puncak (MW)
1	Barito	PLTG/D	Gas/BBM	PLN	314.6	245.7	110.6
2	Pangkalan Bun	PLTU/D	Batubara/BBM	PLN	55.7	32.7	31
3	Kuala Pambuang	PLTD	BBM	PLN	5.4	4.1	3.2
4	Nanga Bulik	PLTD	BBM	PLN	7.5	5	4
5	Kuala Kurun	PLTD	BBM	PLN	4.4	4.3	3.7
6	Puruk Cahu	PLTD	BBM	PLN	6.6	5.7	4.4
7	Sukamara	PLTD	BBM	PLN	5.9	3.4	2.9
8	ULD (56)	PLTD	BBM	PLN	27.7	23.9	16.1
Jumlah					427.8	324.8	175.9



Gambar 3.2 Peta Pengembangan Sistem Tenaga Listrik Provinsi Kalimantan Tengah.

Tabel 3.6 Realisasi Kapasitas Trafo Gardu Induk.

No	GI	Tegangan (KV)	Jumlah	Kapasitas (MVA)
1	Palangkaraya	150/20	2	90
2	Tapping Pulang Pisau	150/20	1	10
3	Sampit	150/20	2	60
4	Kasongan	150/20	1	30
5	Buntok/Ampah	150/20	1	30
6	Muara Teweh	150/20	1	30
Jumlah			8	250

Tabel 3.7 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV.

No	Dari - Ke	Tegangan (KV)	Jenis	KMS
1	PLTU Sampit - Sampit	150	2 cct. ACSR 1xHawk	84
2	Sampit - Pangkalan Bun	150	2 cct. ACSR 2xHawk	344
3	Muara Teweh - Puruk Cahu	150	2 cct. ACSR 2xHawk	94
4	New Palangkaraya - Incomer 1 phi (Selat-Palangkaraya)	150	2 cct. ACSR 1xHawk	2
5	Parenggean - Incomer 1 phi (Kasongan-Sampit)	150	2 cct. ACSR 2xHawk	30
6	Puruk Cahu - Kuala Kurun	150	2 cct. ACSR 2xHawk	196
7	Kasongan - Kuala Kurun	150	2 cct. ACSR 2xHawk	240
8	Palangkaraya – Selat	150	2 cct, HTLS (ext 1xHawk)	248
9	Selat – Seberang Barito	150	2 cct, HTLS (ext 1xHawk)	84
10	PLTU Sampit – Kuala Pambuang	150	2 cct. ACSR 1xHawk	160

Tabel 3.8 Rencana Pengembangan GI.

No	GI	Tegangan (KV)	Ket	Kapasitas (MVA)
1	Sampit <i>Ext</i> LB	150	<i>Ext</i>	2 LB
2	Pangkalan Bun	150/20	<i>New</i>	60
3	Parenggean	150/20	<i>New</i>	30
4	New Palangkaraya	150/20	<i>New</i>	60
5	Puruk Cahu	150/20	<i>New</i>	30
6	Muara Teweh - Puruk Cahu	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
7	Kuala Kurun - Kasongan - P.Cahu	150	<i>Ext LB</i>	4 LB
8	Kasongan - Kuala Kurun	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
9	Kasongan	150/20	<i>Ext</i>	60
10	Pangkalan Bun	150/20	<i>Ext</i>	60
11	PLTU Sampit	150/20	<i>Ext</i>	30
12	Kuala Kurun	150/20	<i>New</i>	30
13	Sampit - PLTU Sampit	150	<i>Ext LB</i>	2 LB

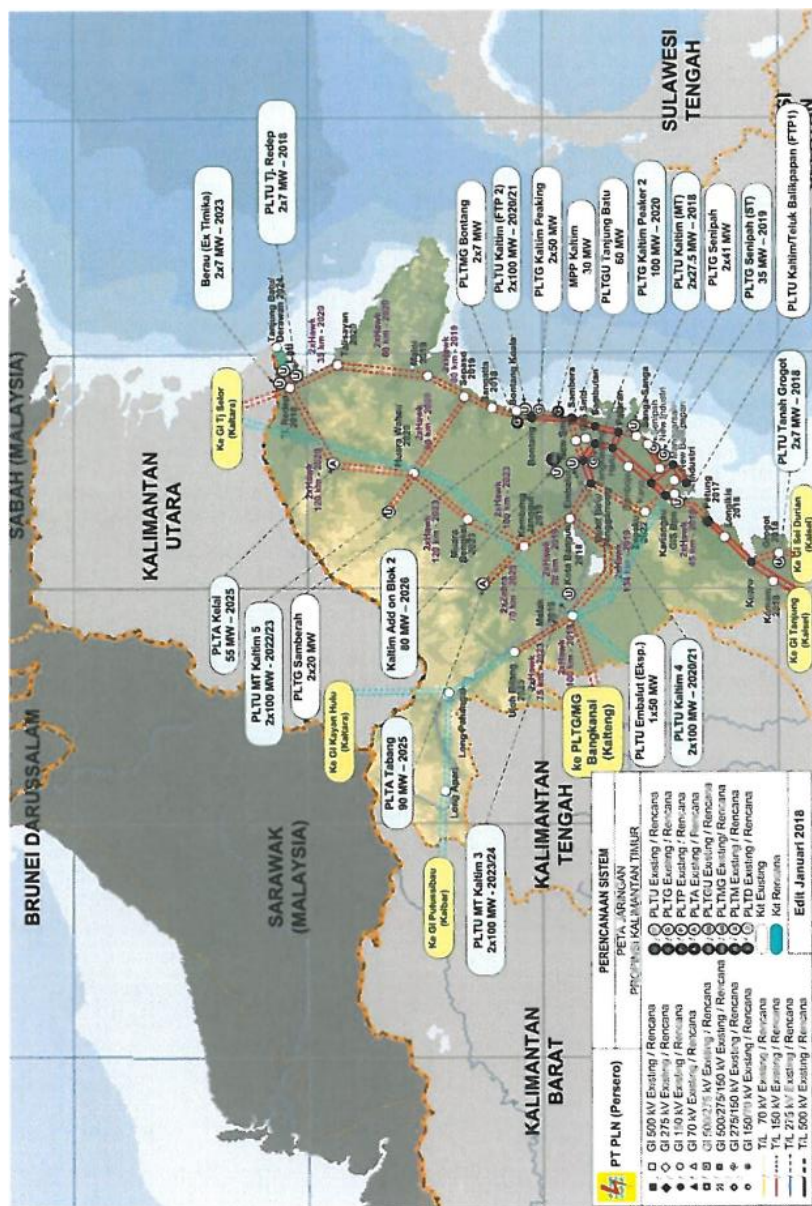
3.2 Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra) 150 KV AC 2018

Perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan area Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra) meliputi wilayah Balikpapan, Samarinda, Bontang dan Tanjung Redeb tertuang dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2018-2027.

Sistem tenaga listrik Kalimantan Timur terdiri atas sistem interkoneksi 150 KV dan sistem *isolated* 20 KV. Pada sistem interkoneksi 150 KV, peran pembangkit berbahan bakar minyak mulai berkurang dengan beroperasinya PLTU IPP CFK ekspansi 50 MW, PLTG IPP Senipah 82 MW dan PLTU Teluk Balikpapan 220 MW yang memberikan penurunan biaya pokok produksi. Kondisi saat ini sistem tenaga listrik dilihat pada **gambar 3.3**, **tabel 3.9** daya terpasang dan beban puncak, **tabel 3.10** kapasitas trafo GI, **tabel 3.11** pengembangan transmisi 150 KV, **tabel 3.12** pengembangan GI.

Tabel 3.9 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting.

No	Sistem	Jenis	Bahan Bakar	PT	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)	Beban Puncak (MW)
1	Mahakam	PLTU/G U/G/D	Batubara/Gas/BBM	Swasta/PLN	811.4	536.23	417.23
2	Petung	PLTD/MG	BBM/Gas	PLN	21.81	18.7	16
3	Tanah Grogot	PLTD	BBM	PLN	21.19	19.09	13.78
4	Melak	PLTD	BBM	PLN	17.2	14.3	9.55
5	Sangatta	PLTD	BBM	PLN	18.5	18.1	15.97
6	Berau	PLTU/D	Batubara/BBM	PLN	27.51	21	18.66
Jumlah					917.61	627.42	491.19



Tabel 3.10 Realisasi Kapasitas Trafo Gardu Induk.

No	GI	Tegangan (KV)	Jumlah	Kapasitas (MVA)
1	Gn Malang / Industri	150/20	3	110
2	Batakan / Manggar Sari	150/20	4	170
3	Karang Joang / Giri Rejo	150/20	3	120
4	Sel Keledang / Harapan Baru	150/20	3	120
5	Tengkawang	150/20	4	180
6	Embalut	150/20	2	60
7	Bukuan	150/20	2	90
8	Tenggarong / Bukit Biru	150/20	2	60
9	Sambutan	150/20	1	30
10	Sambera	150/20	2	60
11	Bontang	150/20	1	30
12	Kuaro / Tanah Grogot	150/20	1	20
13	Petung	150/20	1	30
14	Kariangau	150/20	1	60
15	Senipah	150/20	1	30
16	Sanggatta	150/20	2	60
Jumlah			33	1230

Tabel 3.11 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV.

No	Dari - Ke	Tegangan (KV)	Jenis	KMS
1	PLTU Senipah - Palaran	150	2 cct. ACSR 2xHawk	110
2	PLTU Teluk BPP - Petung	150	2 cct. ACSR 2xHawk	90
3	Tenggarong / Bukit Biru - Kota Bangun	150	2 cct. ACSR 2xHawk	120
4	Bontang - Sanggatta	150	2 cct. ACSR 2xHawk	90
5	New BPP - Incomer 2 phi (Manggarsari-Industri)	150	2 cct. ACSR 1xHawk	2
6	New Samarinda - Sambera	150	2 cct. ACSR 2xZebra	40
7	New BPP - Kariangai	150	2 cct. ACSR 2xZebra	40
8	New Samarinda - Embalut	150	2 cct. ACSR 2xZebra	32
9	Kuaro - Tanah Grogot	150	2 cct. ACSR 2xHawk	32

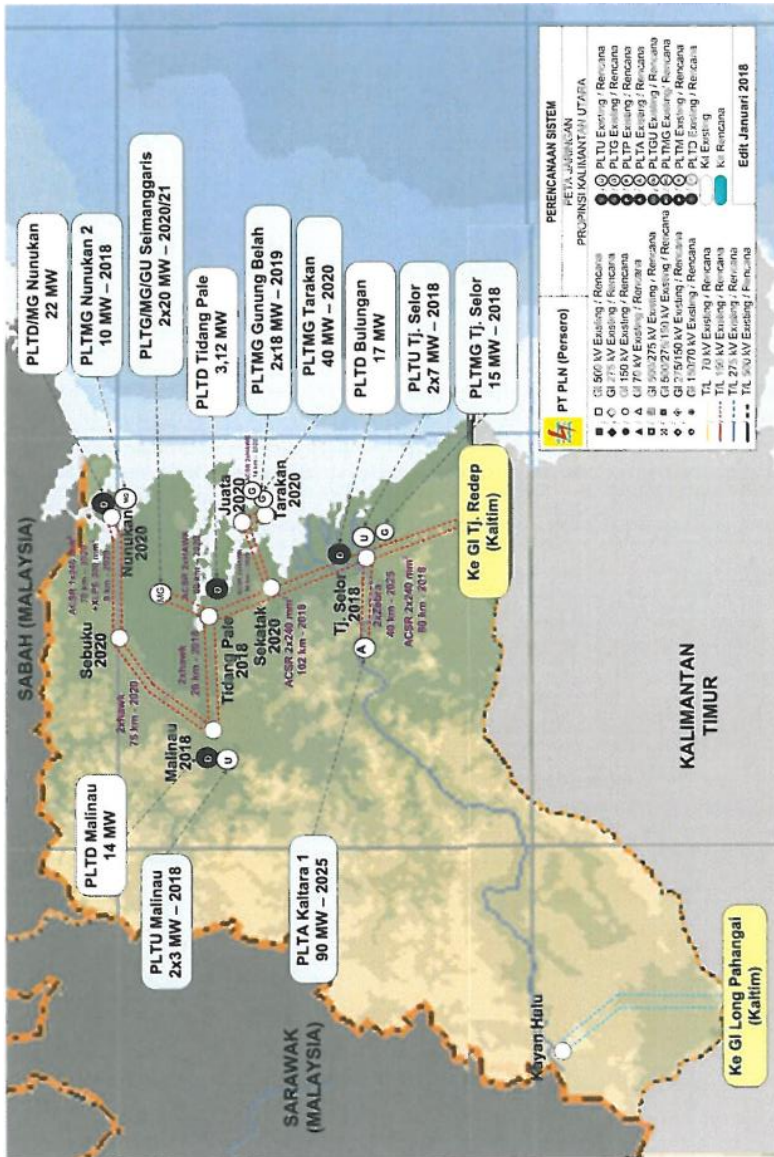
Tabel 3.12 Rencana Pengembangan GI.

No	GI	Tegangan (KV)	Ket	Kapasitas (MVA)
1	Bontang	150/20	<i>Ext</i>	60
2	New Samarinda	150/20	<i>New</i>	60
3	Bontang <i>Ext</i> LB	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
4	Sangatta	150/20	<i>New</i>	60
5	New BPP	150/20	<i>New</i>	60
6	PLTU Teluk BPP - New BPP	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
7	Berau / T.Redep	150/20	<i>New</i>	60
8	Embalut	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
9	Sambera - New Samarinda	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
10	Tana Paser (Grogot)	150/20	<i>New</i>	60
11	Komam (Batu Sopang)	150/20	<i>New</i>	30
12	Lengikis	150/20	<i>New</i>	30
13	Kuaro (Grogot)	150	<i>Ext LB</i>	2 LB
14	Petung	150/20	<i>Ext</i>	60
15	Sanga-Sanga	150/20	<i>New</i>	30

Kalimantan Utara secara resmi terbentuk menjadi provinsi semenjak 16 Nopember 2012 memiliki 4 kabupaten, yaitu Bulungan, Malinau, Nunukan, Tanah Tidung dan 1 Kota Tarakan. Sejalan dengan terbentuknya Provinsi ini, maka kebutuhan tenaga listrik diperkirakan akan tumbuh tinggi. Sesuai dengan letak geografisnya, sistem tenaga listriknya masih merupakan sistem isolated dari PLTD minyak melalui jaringan 20 KV, sehingga harga produksi masih tinggi. Kondisi saat ini sistem tenaga listrik dilihat pada **gambar 3.4**, **tabel 3.13** daya terpasang dan beban puncak, **tabel 3.14** pembangunan pembangkit, **tabel 3.15** pengembangan transmisi 150 KV, **tabel 3.16** pembangunan GI.

Tabel 3.13 Pembangkit Tenaga Listrik Eksisting.

No	Sistem	Jenis	Bahan Bakar	PT	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)	Beban Puncak (MW)
1	Bulungan	PLTD	BBM	Swasta/PLN	20.4	13.9	10.8
2	Nunukan & Sebatik	PLTD/MG	BBM/Gas	Swasta/PLN	21.5	15.5	13.3
3	Malinau	PLTD	BBM	Swasta/PLN	18.2	10.1	7
4	Tidung Pale	PLTD	BBM	PLN	6.3	3	1.7
5	Bunyu	PLTMG/D	BBM/Gas	Swasta/PLN	3	1.9	1.4
6	Turakan	PLTMG/D	BBM/Gas	Swasta/PLN	48.6	42.9	37.5
Jumlah					118	87.3	71.7



Tabel 3.14 Rencana Pembangunan Pembangkit.

No	Sistem	Jenis	Proyek	KAP (MW)	PT
1	Malinau	PLTU	Malinau	2 x 3	PLN
2	Selor	PLTMG	Tanjung Selor	15	PLN
3	Selor	PLTU	Tanjung Selor	14	PLN
4	Nunukan	PLTMG	Nunukan 2	10	PLN

Tabel 3.15 Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV.

No	Dari - Ke	Tegangan (KV)	Jenis	KMS
1	Tanjung Redep - Tanjung Selor	150	2 cct. ACSR 2xHawk	160
2	Tanjung Selor - Tidang Pale	150	2 cct. ACSR 2xHawk	204
3	Tidang Pale - Malinau	150	2 cct. ACSR 2xHawk	52

Tabel 3.16 Rencana Pengembangan GI.

No	GI	Tegangan (KV)	Ket	Kapasitas (MVA)
1	Bulungan / Tanjung Selor	150/20	<i>New</i>	60
2	Tidang Pale / Tana Tidung	150/20	<i>New</i>	20
3	Malinau	150/20	<i>New</i>	30

Sesuai dengan data (**gambar 3.3 & 3.4**) dipaparkan di atas, terlihat jelas bahwa Provinsi Kalimantan Utara masih belum saling interkoneksi dengan Provinsi Kalimantan Selatan namun dalam RUPTL [3] memberikan informasi bahwa sudah tahap pengadaan maupun memasuki tahap konstruksi.

3.3 Proyeksi Pertumbuhan Tenaga Listrik.

Proyeksi kebutuhan energi listrik telah memerhitungkan rencana pengembangan kawasan industri dan beberapa potensi pelanggan industri besar di Kalimantan Selatan antara lain seperti KI Batu Licin, KI Jorong dan pelanggan besar lainnya. Untuk melayani kebutuhan KI dan pelanggan tersebut PLN menyiapkan infrastruktur sisten tenaga listrik (pembangkit, transmisi dan gardu induk).

Pada **tabel 3.17** di bawah ini memberikan informasi proyeksi kebutuhan tenaga listrik yang sudah diringkask dari sub bab 3.2 yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.17 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kalsel.

Tahun	Pertumbuhan Ekonomi (%)	Penjualan (GWh)	Produksi (GWh)	Transmisi (Kms)	Pelanggan
2017	3.9	2,637	3,222	244	1,079,932
2018	5.3	2,867	3,415	516	1,156,848
2019	5.4	3,107	3,761	28	1,206,698
2020	5.3	3,335	4,029	66	1,258,093
Pertumbuhan	5.8%	7.2%	6.7%	854.00	2.7%

Proyeksi kebutuhan energi listrik telah memerhitungkan rencana pengembangan kawasan industri dan beberapa potensi pelanggan industry besar di Kalimantan Tengah. Untuk melayani kebutuhan KI dan pelanggan tersebut PLN menyiapkan infrastruktur sisten tenaga listrik (pembangkit, transmisi dan gardu induk).

Pada **tabel 3.18** di bawah ini memberikan informasi proyeksi kebutuhan tenaga listrik yang sudah diringkaskan dari sub bab 3.2 yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.18 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kalteng.

Tahun	Pertumbuhan Ekonomi (%)	Penjualan (GWh)	Produksi (GWh)	Transmisi (Kms)	Pelanggan
2017	5	1,291	1,559	564	544,421
2018	5.1	1,347	1,642	1,482	605,195
2019	5.1	170	2,060	248	659,890
2020	5.1	1,839	2,215	134	718,933
Pertumbuhan	5.9%	9.2%	8.6%	2,428	5.5%

Proyeksi kebutuhan energi listrik telah memerhitungkan rencana pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Maloy Batuta Trans Kalimantan (KEK-MBTK) dan beberapa potensi pelanggan industry besar di Kalimantan Timur. Untuk melayani kebutuhan KI dan pelanggan tersebut PLN menyiapkan infrastruktur sisten tenaga listrik (pembangkit, transmisi dan gardu induk).

Pada **tabel 3.19** di bawah ini memberikan informasi proyeksi kebutuhan tenaga listrik yang sudah diringkaskan dari sub bab 3.3 yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.19 Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Kaltim.

Tahun	Pertumbuhan Ekonomi (%)	Penjualan (GWh)	Produksi (GWh)	Transmisi (Kms)	Pelanggan
2017	4.4	3,342	3,783	574	841,004
2018	4.4	3,306	3,802	556	959,082
2019	4.4	3,589	4,124	898	1,024,076
2020	4.4	3,828	4,428	700	1,084,317
Pertumbuhan	5.1%	6.9%	6.7%	2,728	4.9%

Data proyeksi di atas dapat disimpulkan bahwa pertumbuhan setiap provinsi memiliki nilai pertumbuhan rata-rata di angka $\pm 7\%$ kecuali provinsi Kalteng yang mencapai $\pm 9\%$. Hal ini dapat digunakan sebagai acuan untuk analisa kestabilan yang akan mendukung keandalan sistem tenaga listrik beberapa tahun ke depan menyesuaikan RUPTL terbaru.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan

Berdasarkan data-data yang ada dilakukan pemodelan dalam bentuk *single line diagram* dari sistem kelistrikan Kalimantan dalam *software DigSILENT Power Factory*. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan menggunakan data-data yang telah di berikan pada bab sebelumnya dan data-data yang terlampir.

Setelah dilakukan pemodelan pada *software DigSILENT Power Factory* selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil konvergen dan berjalan dengan baik. Setelah simulasi aliran daya telah berjalan dengan baik setelah itu *modal analysis* dapat dilakukan dengan menggunakan menu *modal analysis* yang tersedia pada *software DigSILENT Power Factory*. *Modal analysis* membutuhkan model linier dari generator, pada tugas akhir ini *DigSILENT* menggunakan pemodelan *6th order* generator [5, 6] dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta \delta = \omega_0 \Delta \omega \quad (4.1)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - K_D \Delta \omega_m) \quad (4.2)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta \psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta \psi_{fd} + \omega_0 \Delta e_{fd} \quad (4.3)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{1d} = \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta \psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta \psi_{1d} \quad (4.4)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{1q} = \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{1q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{aq} \quad (4.5)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{2q} = \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \Delta \psi_{2q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta \psi_{aq} \quad (4.6)$$

Keterangan :

ω_0 Kecepatan Sudut Rotor
H Inersia

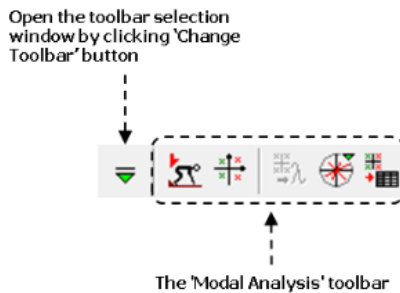
T_m	Torsi Mekanik
T_e	Torsi Elektrik
K_D	Koefisien Torsi Damping
L_{fd}	Field Winding Leakage Inductance
L_{1d}	Reaktansi d-axis amortisseur
L_{1q}, L_{2q}	1 st dan 2 nd q-axis amortisseur resistance reactance
e_{fd}	Tegangan Medan
R_{1d}	d-axis amortisseur resistance
R_{1q}, R_{2q}	1 st dan 2 nd q-axis amortisseur resistance resistance
$\psi_{aq}, \Delta\psi_{ad}$	d and q-axis mutual flux linkages
$\dot{\psi}_{1d}$	d-axis amortisseur flux linkage
$\dot{\psi}_{1q}, \dot{\psi}_{2q}$	1 st dan 2 nd q-axis amortisseur flux linkage

4.1.1 Modal Analysis pada DigSILENT Power Factory


Modal analysis digunakan untuk mengalkulasi nilai *eigenvalue* dan *eigenvector* dari sistem multi-mesin. Metode ini bias disebut dengan *small-signal stability analysis*, berikut langkah yang dilakukan untuk mendapatkan nilai *eigenvalue* :



4.1.1.1 Memulai Modal Analysis

Memilih toolbar Modal Analysis dengan memilih seperti pada gambar berikut :



Gambar 4.1 *Toolbar Modal Analysis.*

1. *Calculate initial condition* menggunakan tombol  lalu pilih tombol execute. Pada tahap ini nilai load flow harus konvergen.

2. Setelah *initial condition* telah dilakukan, selanjutnya klik  untuk melakukan perhitungan nilai *eigenvalue*.
3. Setelah perhitungan *eigenvalue* telah dilakukan kita dapat melihat hasil nilai-nilai *eigenvalue* dengan menggunakan tombol  .

4.1.1.2 Basic Command Pada Modal Analysis

Pada menu ini dibagi menjadi dua metode perhitungan yaitu :

1. QR / QZ-Method : Metode ini adalah metode 'klasik' untuk menghitung semua *eigenvalue* sistem.
2. *Selective Modal Analysis* (Arnoldi / Lanczos); Metode ini hanya menghitung subset dari *eigenvalue* sistem di sekitar titik referensi tertentu. Seringkali metode ini digunakan dalam sistem yang sangat besar ketika menggunakan metode QR bisa sangat memakan waktu. Ini sangat berguna jika pengguna mengetahui area target yang diminati untuk *eigenvalue*.

4.1.1.3 Pengaturan Lanjutan

Pada menu ini dibagi menjadi dua metode perhitungan yaitu :

1. *Left Eigenvectors (Controllability)*; Jika opsi ini diaktifkan, perintah *Modal Analysis* akan hitung vektor Eigen Kiri. Ini diaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Controllability untuk mode apa pun menggunakan Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot.
2. *Right Eigenvectors (Observability)*; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *Modal Analysis* akan menghitung Eigenvectors Kanan (Pengamatan) untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Observability untuk setiap mode baik dalam Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot.
3. *Participation Factor* ; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *Modal Analysis* akan menghitung Faktor Partisipasi untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Faktor Partisipasi untuk mode apa pun menggunakan Mode Phasor Plot atau Mode Bar Plot.

4.1.1.4 Melihat Hasil Modal Analysis

Ada beberapa cara bagi pengguna untuk melihat hasil perhitungan Modal Analisis, termasuk melalui laporan yang sudah ditetapkan ke

Output Window, menggunakan plot built-in dalam PowerFactory atau menggunakan spreadsheet seperti browser data. Selain itu, pengguna dapat mencari objek individu dalam database dan melihat Controllability, Observability dan Partisipasi untuk mode tertentu dalam manajer data atau objek yang familiar.

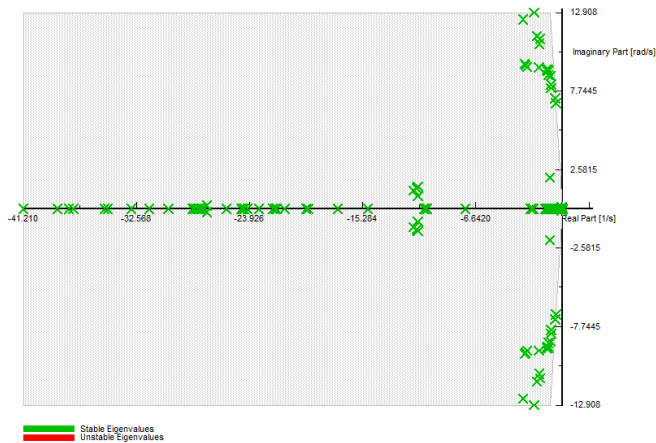
1. Klik kiri pada ikon Output Calculation Analysis akan muncul dialog output result.
2. Pilih Eigenvalues, pada kolom output of eigenvalue pilih nilai yang ingin dilihat.
3. Setelah muncul pada kolom variable selection pilih nilai eigenvalue yang ini dilihat dan state variable yang ingin dilihat. Lalu tekan execute.

4.2 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur 2018

Pada tahun 2018 sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara sesuai data dari RUPTL, kondisi interkoneksi hanya di berada pada titik transmisi Tanjung Redep menuju Tanjung Selor sedangkan Tanjung Redep menuju Sangatta direncanakan tahun 2020. Maka dengan data tersebut mengindikasikan bahwa sistem kelistrikan Kalimantan Utara belum terinterkoneksi secara menyeluruh dan diabaikan pada pemaparan hasil analisa di bawah ini.

4.2.1 Nilai Eigenvalue

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan Timur pada tahun 2018 menghasilkan 240 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai menunjukkan sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* bernilai negatif, berikut adalah gambar plot nilai *eigenvalue* :



Gambar 4.2 Plot *Eigenvalue* Kaltim 2018.

Dari 240 nilai *eigenvalue* menampilkan beberapa nilai dengan *damping ratio* di bawah 10% yang selanjutnya akan dianalisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* di bawah 5%, hal ini dikarenakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat menuju *steady state* memungkinkan sistem mengalami *breakdown*.

Tabel 4.1 *Eigenvalue* dengan *Damping* di Bawah 10%.

Mode	Real part	Imaginary part	Frequency	Damping Ratio
70	-0.49514	6.94564	1.10543	7.11%
68	-0.57299	7.27815	1.15835	7.85%
54	-0.89455	8.72923	1.38930	10.19%

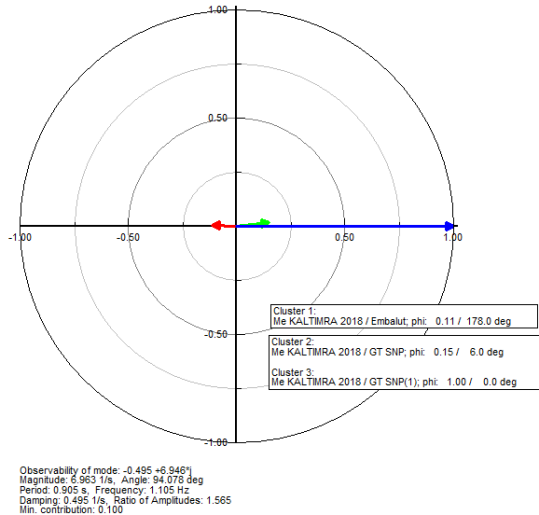
Pada hasil di atas, dapat dilihat *damping ratio* tidak ada yang bernilai di bawah 5%, hal ini memungkinkan tidak perlunya dilakukan analisis pembangkit yang berpengaruh pada area ini, namun sebagai pembandingan akan dilakukan analisa dengan mode 70.

4.2.2 Mode Shape *Eigenvalue* (Mode 70)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *mode shape* atau *observeability* sudut rotor (δ) dengan Mode 70 dari data **tabel 4.1**, sebagai berikut :

Tabel 4.2 *Observeability δ Mode 70.*

<i>Observeability δ</i>		
Pembangkit	Magnitude	Angle
GT SNP (1)	1	0
GT SNP	0.148	5.99
Embalut	0.115	178.05



Gambar 4.3 *Phasor Plot Observeability δ Mode 70.*

Dari hasil 2 data di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 70 mengalami osilasi *local-area* karena hanya melibatkan pembangkit pada area Kaltim saja tepatnya pada pembangkit GT SNP (1) yang saling berosilasi terhadap pembangkit Embalut karena sudutnya berlawanan atau *counter phase* dan dapat dikatakan sebagai pembangkit yang *observeable*.

4.2.3 Participation Factor (Mode 70)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *participation factor* sudut rotor (δ) dan kecepatan sudut rotor (ω) untuk mengetahui *state variable* dan generator yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* dengan Mode 70 dari data **tabel 4.1**, sebagai berikut :

Tabel 4.3 *Participation Factor δ Mode 70.*

<i>Participation Factor δ</i>	
Pembangkit	<i>Magnitude</i>
GT SNP (1)	0.948

Tabel 4.4 *Participation Factor ω Mode 70.*

<i>Participation Factor ω</i>	
Pembangkit	<i>Magnitude</i>
GT SNP (1)	1

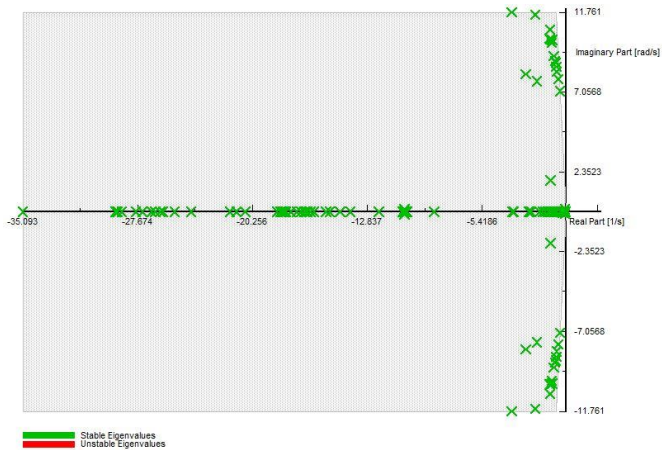
Dari hasil 2 data tabel di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 70 nilai *participation factor* terbesar berasal dari *state* yang berhubungan dengan rotor. Hal ini memberikan hasil bahwa dengan kondisi pembangkit generator GT SNP (1) yang *observable* dan nilai *participation factor* besar, akan lebih rentan terhadap gangguan selain pembangkit lainnya dalam 1 area.

4.3 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah 2018

Pada tahun 2018 sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng) sesuai data dari bab 3, sudah terinterkoneksi pada titik transmisi Seberang Barito menuju Selat dan Tanjung menuju Buntok. Maka dengan data tersebut mengindikasikan bahwa sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah terinterkoneksi secara sebagian yang akan diperoleh hasil analisa di bawah ini.

4.3.1 Nilai Eigenvalue

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalselteng pada tahun 2018 menghasilkan 242 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai menunjukkan sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* bernilai negatif, berikut adalah gambar plot nilai *eigenvalue* :



Gambar 4.4 Plot *Eigenvalue* Kalselteng 2018.

Dari 242 nilai *eigenvalue* menampilkan beberapa nilai dengan *damping ratio* di bawah 10% yang selanjutnya akan dianalisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* di bawah 5%, hal ini dikarenakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat menuju *steady state* memungkinkan sistem mengalami *breakdown*.

Tabel 4.5 *Eigenvalue* dengan *Damping* di Bawah 10%

Mode	Real part	Imaginary part	Frequency	Damping Ratio
75	-0.39110	7.12639	1.13420	5.48%
69	-0.49930	7.82336	1.24513	6.37%
66	-0.59355	8.23587	1.31078	7.19%
64	-0.62495	8.53712	1.35873	7.30%
56	-0.68000	8.77563	1.39669	7.73%
54	-0.72100	8.88712	1.41443	8.09%
52	-0.78384	9.18742	1.46222	8.50%
48	-0.89523	10.13027	1.61228	8.80%

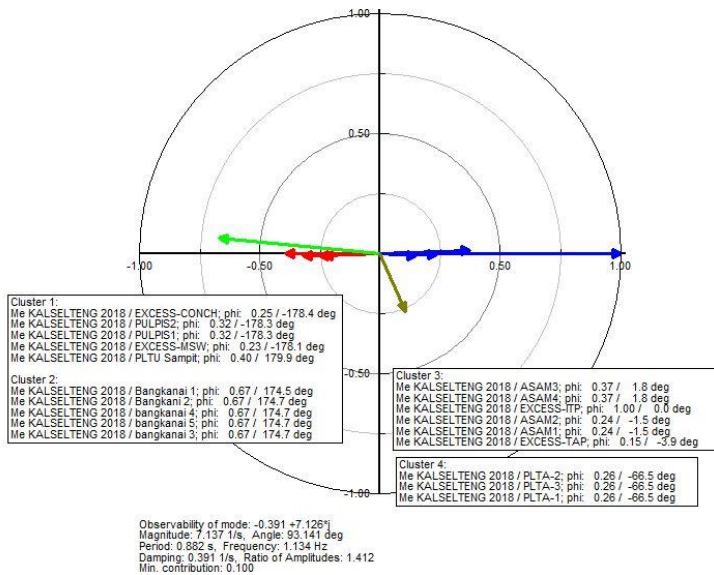
Pada hasil di atas, dapat dilihat *damping ratio* tidak ada yang bernilai di bawah 5%, hal ini memungkinkan tidak perlunya dilakukan analisis pembangkit yang berpengaruh pada area ini, namun sebagai pembandingan akan dilakukan analisa dengan mode 75.

4.3.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 75)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *mode shape* atau *observeability* sudut rotor (δ) dengan Mode 75 dari data **tablel 4.5**, sebagai berikut :

Tabel 4.6 *Observeability δ Mode 75.*

<i>Observeability δ</i>		
Pembangkit	<i>Magnitude</i>	<i>Angle</i>
EXCESS-ITP	1	0
Bangkanai 1	0.674	174.46
Bangkanai 2	0.672	174.69
Bangkanai 3	0.672	174.69
Bangkanai 4	0.672	174.69
Bangkanai 5	0.672	174.69
Asam 4	0.542	80.25
Asam 3	0.374	1.76
PLTU Sampit	0.369	179.94
Pulpis 1	0.322	-178.3
Pulpis 2	0.322	-178.3
PLTA 1	0.262	-66.54
PLTA 2	0.262	-66.54
PLTA 3	0.262	-66.54
EXCESS-CONCH	0.251	-178.4
Asam 1	0.236	-1.47
Asam 2	0.236	-1.47
EXCESS-MSW	0.234	-178.1
EXCESS-TAP	0.149	-3.9



Gambar 4.5 Phasor Plot Observability δ Mode 75.

Dari hasil 2 data di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 70 mengalami osilasi *local-area* karena hanya melibatkan pembangkit pada area Kaltim saja tepatnya pada pembangkit EXCESS-ITP yang saling berosilasi terhadap pembangkit Bankanai 1 karena sudutnya berlawanan atau *counter phase* dan dapat dikatakan sebagai pembangkit yang *observeable*.

4.3.3 Participation Factor (Mode 75)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *participation factor* sudut rotor (δ) dan kecepatan sudut rotor (ω) dengan Mode 75 dari data **tabel 4.5**, sebagai berikut :

Tabel 4.7a Participation Factor δ Mode 75.

Participation Factor δ	
Pembangkit	Magnitude
EXCESS-ITP	0.853
Bangkanai 1	0.543
Bangkanai 2	0.534
Bangkanai 3	0.534

Tabel 4.7b *Participation Factor δ Mode 75.*

<i>Participation Factor δ</i>	
Pembangkit	Magnitude
Bangkanai 4	0.534
Bangkanai 5	0.534
Asam 3	0.345
Asam 4	0.345
Asam 1	0.155
Asam 2	0.155
Pulpis 1	0.139
Pulpis 2	0.139

Tabel 4.8 *Participation Factor ω Mode 75.*

<i>Participation Factor ω</i>	
Pembangkit	Magnitude
EXCESS-ITP	1
Bangkanai 1	0.495
Bangkanai 2	0.492
Bangkanai 3	0.492
Bangkanai 4	0.492
Bangkanai 5	0.492
Asam 3	0.463
Asam 4	0.463
Asam 1	0.235
Asam 2	0.235
Pulpis 1	0.1
Pulpis 2	0.1

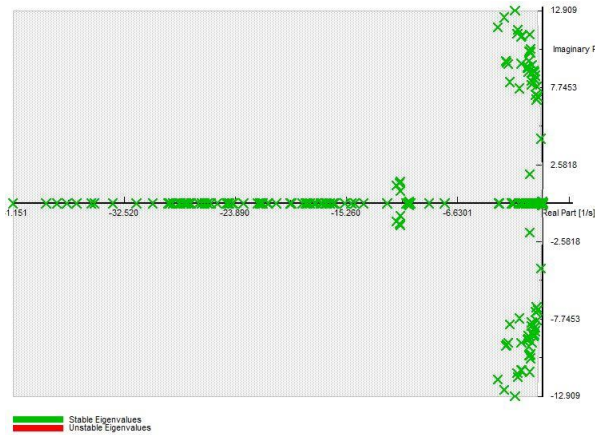
Dari hasil 2 data tabel di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 75 nilai *participation factor* terbesar berasal dari *state* yang berhubungan dengan rotor. Hal ini memberikan hasil bahwa dengan kondisi pembangkit generator EXCESS-ITP yang *observeable* dan nilai *participation factor* besar, akan lebih rentan terhadap gangguan selain pembangkit lainnya dalam 1 area.

4.4 Modal Analysis interkoneksi Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan 2018

Pada tahun 2018 sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan-Tengah (Kalselteng) sesuai data dari bab 3, sudah terinterkoneksi pada titik transmisi Kuaro menuju Tanjung. Maka dengan data tersebut mengindikasikan bahwa sistem kelistrikan terinterkoneksi secara menyeluruh yang akan diperoleh hasil analisa di bawah ini.

4.4.1 Nilai Eigenvalue

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan-Tengah (Kalselteng) pada tahun 2018 menghasilkan 482 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai menunjukkan sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* bernilai negatif, berikut adalah gambar plot nilai *eigenvalue* :



Gambar 4.6 Plot *Eigenvalue* Kaltim & Kalselteng 2018.

Dari 482 nilai *eigenvalue* menampilkan beberapa nilai dengan *damping ratio* di bawah 10% yang selanjutnya akan dianalisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* di bawah 5%, hal ini dikarenakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali dalam kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada saat menuju *steady state* memungkinkan sistem mengalami *breakdown*.

Tabel 4.9a *Eigenvalue* dengan *Damping* di Bawah 10%

Mode	Real part	Imaginary part	Frequency	Damping Ratio
177	-0.15159	4.33952	0.69066	3.49%
151	-0.39690	7.15862	1.13933	5.54%
141	-0.50064	7.83805	1.24747	6.37%
155	-0.49581	6.94499	1.10533	7.12%
133	-0.60042	8.27987	1.31778	7.23%
127	-0.63263	8.56014	1.36239	7.37%
125	-0.68022	8.77527	1.39663	7.73%
153	-0.57365	7.27115	1.15724	7.86%

Tabel 4.9b *Eigenvalue* dengan *Damping* di Bawah 10%

Mode	Real part	Imaginary part	Frequency	Damping Ratio
123	-0.72659	8.89982	1.41645	8.14%
121	-0.83486	9.29473	1.47930	8.95%
85	-1.03006	11.28704	1.79639	9.09%
97	-0.97217	10.36564	1.64974	9.34%
107	-0.96345	10.10182	1.60775	9.49%

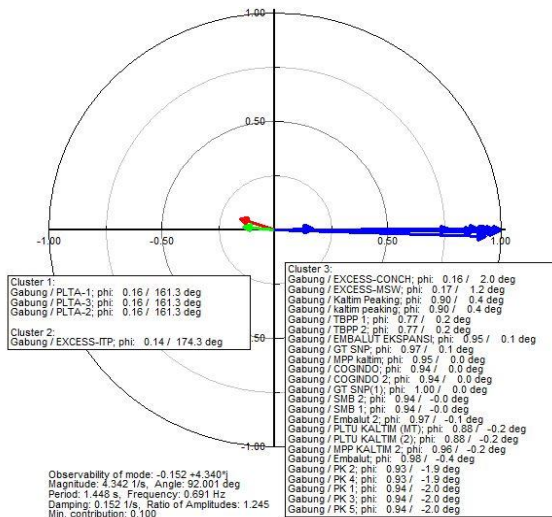
Pada mode 177 dapat dilihat *damping ratio* bernilai di bawah 5% mendekati titik kritis atau sumbu positif dimana perlu dilakukan analisis pembangkit yang berpengaruh pada area ini.

4.4.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 177)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *mode shape* atau *observeability* sudut rotor (δ) dan kecepatan sudut rotor (ω) dengan Mode 177 dari data **table 4.9**, sebagai berikut :

Tabel 4.10 *Observeability* δ Mode 177.

<i>Observeability</i> δ			
Pembangkit	Area	Magnitude	Angle
GT SNP (1)	Kaltim	1	0
Embalut	Kaltim	0.983	-0.43
Embalut 2	Kaltim	0.976	-0.15
GT SNP	Kaltim	0.97	0.08
MPP Kaltim 2	Kaltim	0.961	-0.16
MPP Kaltim	Kaltim	0.952	0.03
Embalut ekspansi	Kaltim	0.948	0.09
SMB 1	Kaltim	0.938	0
SMB 2	Kaltim	0.938	0
Cogindo	Kaltim	0.936	0.03
Cogindo 2	Kaltim	0.936	0.03
PK 1	Kaltim	0.935	-2
PK 3	Kaltim	0.935	-2
PK 5	Kaltim	0.935	-2
PK 2	Kaltim	0.932	-1.89
PK 4	Kaltim	0.932	-1.89
Kaltim Peaking	Kaltim	0.899	0.4
Kaltim Peaking	Kaltim	0.899	0.4
PLTU Kaltim (MT)	Kaltim	0.875	-0.16
PLTU Kaltim (2)	Kaltim	0.875	-0.16
TBPP 1	Kaltim	0.769	0.17
TBPP 2	Kaltim	0.769	0.17
EXCESS-MSW	Kalselteng	0.17	1.22
PLTA 1	Kalselteng	0.165	161.26



Gambar 4.7 Phasor Plot Observeability δ Mode 177.

Dari hasil 2 data di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 177 mengalami osilasi *inter-area* karena hanya melibatkan pembangkit pada area Kaltim saja tepatnya pada pembangkit GT SNP (1) yang saling berosilasi terhadap pembangkit EXCESS-MSW karena sudutnya berlawanan atau *counter phase* dan dapat dikatakan sebagai pembangkit yang *observable*.

4.4.3 Participation Factor (Mode 177)

Pada sub-bab ini akan menampilkan hasil *participation factor* sudut rotor (δ) dan kecepatan sudut rotor (ω) dengan Mode 177 dari data **tabel 4.9**, sebagai berikut :

Tabel 4.11a Participation Factor δ Mode 177.

Participation Factor δ		
Pembangkit	Area	Magnitude
GT SNP (1)	Kaltim	0.947
PK 2	Kaltim	0.871
PK 4	Kaltim	0.871
GT SNP	Kaltim	0.868
PK 1	Kaltim	0.86
PK 3	Kaltim	0.86

Tabel 4.11b *Participation Factor δ Mode 177.*

<i>Participation Factor δ</i>		
Pembangkit	Area	Magnitude
PK 5	Kaltim	0.86
TBPP 1	Kaltim	0.786
TBPP 2	Kaltim	0.786
Embalut ekspansi	Kaltim	0.703
Kaltim Peaking	Kaltim	0.674
Kaltim Peaking	Kaltim	0.674
Embalut	Kaltim	0.644
Embalut 2	Kaltim	0.636
MPP Kaltim 2	Kaltim	0.361
MPP Kaltim	Kaltim	0.354
SMB 1	Kaltim	0.337
SMB 2	Kaltim	0.337
Cogindo	Kaltim	0.337
Cogindo 2	Kaltim	0.337
PLTU Kaltim (MT)	Kaltim	0.274
PLTU Kaltim (2)	Kaltim	0.274

Tabel 4.12a *Participation Factor ω Mode 177.*

<i>Participation Factor ω</i>		
Pembangkit	Area	Magnitude
MPP Kalsel	Kalselteng	1
GT SNP (1)	Kaltim	0.685
Asam 3	Kalselteng	0.665
Asam 4	Kalselteng	0.665
PK 2	Kaltim	0.646
PK 4	Kaltim	0.646
Asam 1	Kalselteng	0.644
Asam 2	Kalselteng	0.644
PK 1	Kaltim	0.64
PK 3	Kaltim	0.64
PK 5	Kaltim	0.64
GT SNP	Kaltim	0.615
Pulpis 1	Kalselteng	0.578
Pulpis 2	Kalselteng	0.578
Embalut ekspansi	Kaltim	0.53
Kaltim Peaking	Kaltim	0.507
Kaltim Peaking	Kaltim	0.507
Embalut	Kaltim	0.498
Embalut 2	Kaltim	0.498
TBPP 1	Kaltim	0.49
TBPP 2	Kaltim	0.49
EXCESS-ITP	Kalselteng	0.34

Tabel 4.12b *Participation Factor* ω Mode 177.

<i>Participation Factor</i> ω		
Pembangkit	Area	Magnitude
Bangkitanai 1	Kalselteng	0.323
Bangkitanai 2	Kalselteng	0.32
Bangkitanai 3	Kalselteng	0.32
Bangkitanai 4	Kalselteng	0.32
Bangkitanai 5	Kalselteng	0.32
MPP Kaltim 2	Kaltim	0.275
MPP Kaltim	Kaltim	0.268
SMB 1	Kaltim	0.252
SMB 2	Kaltim	0.252
Cogindo	Kaltim	0.252
Cogindo 2	Kaltim	0.252
EXCESS-TAP	Kalselteng	0.25
EXCESS-WIJAYA	Kalselteng	0.217
PLTU Kaltim (MT)	Kaltim	0.193
PLTU Kaltim (2)	Kaltim	0.193
EXCESS-RIMAU	Kalselteng	0.152
PLTU Sampit	Kalselteng	0.117
PLTA 1	Kalselteng	0.098
PLTA 2	Kalselteng	0.098
PLTA 3	Kalselteng	0.098
EXCESS-CONCH	Kalselteng	0.069
EXCESS-MSW	Kalselteng	0.066

Dari hasil 2 data tabel di atas dapat dilihat bahwa dalam mode 177 nilai *participation factor* terbesar berasal dari *state* yang berhubungan dengan rotor. Hal ini memberikan hasil bahwa dengan kondisi pembangkit generator GT SNP (1) yang *observeable* dan nilai *participation factor* besar (terbesar MPP Kalsel), akan lebih rentan terhadap gangguan selain pembangkit lainnya dalam 1 area.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan studi kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan Timur .yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Proyeksi pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik rata-rata setiap provinsi (Kaltim, Kalsel) mencapai $\pm 7 \%$ kecuali provinsi Kalteng mencapai $\pm 9 \%$ dengan acuan tahun 2017-2020.
2. Interkoneksi sistem kelistrikan provinsi Kaltim yang selanjutnya disebut area 3 menunjukkan hasil stabil dan mode osilasi *local-area*.
3. Interkoneksi sistem kelistrikan antar provinsi Kalsel-Kalteng yang selanjutnya disebut area 2 menunjukkan hasil stabil dan mode osilasi *local-area*.
4. Interkoneksi antar area 2-3 (Kaltim-Kalselteng) menunjukkan hasil stabil dan mode osilasi *inter-area*.
5. Nilai *eigenvalue* terkecil dan damping terendah adalah - 0.15158 \pm 4.3395 dan 3.49% ketika 2 area saling interkoneksi.
6. *Eigenvalue*, *damping* ratio dan frekuensi osilasi dari suatu mode dipengaruhi oleh topologi dari sistem, kondisi operasi pembangkit, dan kondisi pembebanan.
7. Frekuensi osilasi untuk *mode local-area* selalu lebih besar jika dibandingkan dengan frekuensi osilasi *mode inter-area*.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan studi lanjutan untuk meningkatkan nilai *damping ratio* yang rendah pada nilai *eigenvalue* dengan mengikuti RUPTL terbaru.
2. Dalam penelitian selanjutnya dilakukan studi kestabilan transient untuk mengetahui kestabilan sistem dari sisi kestabilan Transient.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
- [2] P. Kundur and e. al, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, May 2004.
- [3] P. P. (Persero). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2018-2027*.
- [4] P. P. (Persero). *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2018-2037*.
- [5] D. P. GmbH. *DigSILENT PowerFactory 15.1.2 User's Manual*.
- [6] A. V. Ubisse, "Comparison of DigSILENT, Matlab PST and PSAT for Steady State and Stability Studies on HVAC-HVDC Systems " Master, Electrical Engineering University of Cape Town Cape Town, 2012.
- [7] A. Prakasha, "Fundamental Study of Small-Signal Stability of Hybrid Power Systems," Master, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Netherlands, 2017.
- [8] F. Dussaud, "An Application of Modal Analysis in Electric Power Systems to Study Inter-area Oscillations," Electrical Engineering, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Stockholm, Sweden, 2015.
- [9] D. V. Nair and M. S. R. Murty, "Modal analysis of Power System and study of oscillatory instability," in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2016, pp. 667-672.
- [10] G. Á and P. Monzón, "Modal analysis of the Uruguayan electrical power system," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-6.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIOGRAFI PENULIS



Wahyu Asrofi Ramadhan, dilahirkan di Surabaya tanggal 8 Maret 1993. Penulis merupakan putra kedua dari Bapak Maladi Asro dan Ibu Nanik Widyaningsih. Penulis memasuki pendidikan dari TK Islam Al-Mufidah (1999), SDN Kendangsari II (2005), SMPN 13 (2008), SMAN 17 Surabaya (2011), kemudian memutuskan melanjutkan studi ke perguruan tinggi negeri Institut Teknologi Sepuluh Nopember memilih Departemen Teknik Elektro. Pada masa perkuliahan penulis aktif pada kegiatan sosial di luar lingkungan kampus dan berwiraswasta di bidang otomotif selama 3 tahun yang lambat laun beralih ke bidang kontraktor listrik hingga sekarang. Penulis juga sangat tertarik dengan kajian islam serta seminar dengan topik bisnis dan khususnya parenting, karena *“menjadi pendengar yang baik itu sulit”* serta terinspirasi filosofi dari salah satu tokoh bangsa di Sulawesi yang diabadikan namanya untuk Bandara Manado, Sam Ratulangi.

“Si Tou Timou Tumou Tou”